

ÉCOLE D'INGÉNIERIE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIERES

TRAVAIL DIRIGÉ ET RAPPORT D'ACTIVITÉS PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
MARTIN RHEAULT,ing.

**LES SYSTÈMES MANUFACTURIERS
CELLULAIRES DYNAMIQUES**

Avril 1999

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

ÉCOLE D'INGÉNIERIE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIERES

TRAVAIL DIRIGÉ ET RAPPORT D'ACTIVITÉS PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
MARTIN RHEAULT,ing.

**LES SYSTÈMES MANUFACTURIERS
CELLULAIRES DYNAMIQUES**

Avril 1999

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un nouveau concept de cellules dynamiques s'adaptant à la fois aux contraintes d'un environnement turbulent et aux contraintes physiques des installations industrielles. Ce concept se base sur l'affirmation que les postes de travail ou les machines peuvent être relocalisés lorsqu'il est économiquement justifiable de le faire. Il s'articule à l'intérieur d'un Système Manufacturier Cellulaire Dynamique (SMCD) qui se schématise par une boucle fermée composée de 4 modules. Ce mémoire porte plus spécifiquement sur le développement de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques rendant possible les SMCD. L'expérimentation démontre que cet algorithme suggère toujours le meilleur aménagement économique possible pour un horizon donné compte tenu de la configuration actuelle. De plus, cet algorithme donne de meilleurs résultats que la matrice pièces/machines de Burbidge. Enfin, l'expérimentation permet d'estimer la pertinence du concept cellulaire dynamique comme mode de production performant en contexte d'un environnement turbulent.

REMERCIEMENTS

On dit que la plus grande qualité d'un mémoire est un mémoire complété. Si ce mémoire a pu finalement être terminé, c'est grâce au soutien et aux conseils de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de recherche Jocelyn Drolet. Il a su, durant ces années, stimuler en moi ce désir d'aller au fond des choses et de me surpasser. Doué d'un sens critique pragmatique, Jocelyn m'a guidé, tout au long de mes travaux, sans jamais brimer mon imagination et mon individualité.

Je remercie Georges Abdounour pour sa disponibilité et sa générosité de cœur. Tel un ami, il fut toujours là quand j'en avait le besoin.

Si j'ai fait ma maîtrise, c'est grâce au soutien de la Chaire Bombardier Sea-doo/Ski-doo en gestion du changement technologique dans les PME. Je tiens à les remercier pour m'avoir appris les vertus de la recherche et, plus particulièrement, l'intégrité scientifique. De plus, leur soutien financier m'a permis d'avoir un mode de vie raisonnable, abstraction faite du manque chronique d'heures de sommeil. Merci à toute l'équipe.

Je voudrais remercier mes parents pour leurs encouragements ainsi que mon épouse Isabelle pour sa contribution morale avant et pendant la maîtrise. Elle a toujours cru en moi et je lui ai toujours fait confiance.

À tous, merci !

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENT	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
1. INTRODUCTION	1
1.1 ENVIRONNEMENT TURBULENT	2
1.2 LA RECHERCHE DE FLEXIBILITÉ	4
1.3 ÉVOLUTION DES MODES DE PRODUCTION	6
1.3.1 Les systèmes manufacturiers.....	6
1.3.2 Les ateliers multigammes.....	7
1.3.3 La production en ligne de produit	8
1.3.4 Les cellules de production	9
1.3.5 Les Systèmes Manufacturiers Flexibles	13
1.3.6 Les cellules virtuelles.....	14
1.4 LE CYCLE DE VIE D'UN AMÉNAGEMENT	16
1.4.1 La relation Productivité/Flexibilité	17
1.4.2 Un 3 ^e axe: Le cycle de vie de l'aménagement.....	17
2. CONCEPT THÉORIQUE.....	21
2.1 LE CONCEPT DES CELLULES DYNAMIQUES	21
2.1.1 La mobilité des équipements et des postes de travail	22
2.1.1.1 La manutention des équipements lors de la configuration des cellules	23
2.1.1.2 Les servitudes et les alimentations disponibles	23
2.1.1.3 L'environnement des postes de travail	24
2.1.2 Le regroupement des postes par zone physique.....	24
2.2 UN SYSTÈME MANUFACTURIER CELLULAIRE DYNAMIQUE	25
2.2.1 Le module de cheminement et d'affectation.....	26
2.2.1.1 Les familles dynamiques	26

2.2.2 Le module de configuration des cellules dynamiques.....	27
2.2.2.1 L'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules	28
2.2.2.2 L'élaboration des coûts de configuration	30
2.2.2.3 L'élaboration des coûts de manutention	32
2.2.3 Le module d'ordonnancement	32
2.2.4 Le module de contrôle du système	34
2.2.4.1 Reconfiguration par période fixe ou saisonnière	35
2.2.4.2 Reconfiguration par capacité requise.....	35
2.2.4.3 Reconfiguration par le niveau de changement du mixte de produits.....	36
3. L'EXPÉRIMENTATION	38
3.1 OBJECTIFS, HYPOTHÈSES ET LIMITES.....	38
3.1.1 Hypothèses expérimentales.....	38
3.1.2 Hypothèses relatives à la modélisation.....	39
3.1.3 Limites relatives à l'expérimentation.....	40
3.1.4 Outils et concepts utilisés pour la simulation	41
3.1.4.1 Génération des données.....	41
3.1.4.2 Codification et résolution du modèle.....	42
3.1.5 Données initiales	43
3.2 ANALYSE DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION	45
3.2.1 Analyse détaillée des comportements de l'algorithme.....	45
3.2.1.1 optimisation des flux les plus coûteux.....	46
3.2.1.2 Centralisation des goulots.....	48
3.2.1.3 Configuration dépendante de la séquence des opérations des produits	48
3.2.1.4 Relocalisation de postes inutilisés pour récupérer l'espace d'une zone.....	50
3.2.1.5 Optimisation des proximités postes/zones	51
3.2.1.6 Optimisation de l'aménagement en comparaison de l'aménagement précédent.....	52
3.2.1.7 Exemple de calculs :	53
3.2.2 Analyse de la comparaison de l'algorithme du coût marginal minimal avec la PFA de Burbidge	55
3.2.3 Analyse du comportement du concept des cellules dynamiques	58
3.2.3.1 Le cycle de vie des configurations.....	59
4. CONCLUSION	61
5. RÉFÉRENCES	65

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COÛTS FIXES PAR POSTE DE TRAVAIL.....	45
TABLEAU 2: COÛTS VARIABLES (\$) D'UNE ZONE À L'AUTRE	45
TABLEAU 3: DISTANCE EN UNITÉ DE LONGUEUR D'UNE ZONE À L'AUTRE.....	45
TABLEAU 4 : LOCALISATION DES POSTES DANS LES ZONES APRÈS CHAQUE CONFIGURATION	46
TABLEAU 5 : PRODUCTION DU 1 ^{ER} HORIZON DE PLANIFICATION.....	49
TABLEAU 6 : PFA DE BURBIDGE AVEC LE 1 ^{ER} HORIZON.....	49
TABLEAU 7 : PFA DE BURBIDGE POUR LE 2 ^E HORIZON	51
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES COÛTS MARGINAUX ENTRE LA CONFIGURATION PROPOSÉE ET PRÉCÉDENTE.....	53
TABLEAU 9 : PFA DE BURBIDGE DU 4E HORIZON	56
TABLEAU 10 : COMPARAISON DES COÛTS MARGINAUX DE MANUTENTION ET DE CONFIGURATION	59

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: RELATION ENTRE LE VOLUME DE PRODUCTION ET LA VARIÉTÉ DE PRODUITS	7
FIGURE 2: RELATION ENTRE PRODUCTIVITÉ, FLEXIBILITÉ ET DURÉE D'UN AMÉNAGEMENT	19
FIGURE 3: LE SYSTÈME MANUFACTURIER CELLULAIRE DYNAMIQUE	26
FIGURE 4 : AMÉNAGEMENT INITIAL EN ATELIERS MULTIGAMMES	43
FIGURE 5 : DIAGRAMME DES FLUX DE PRODUCTION EN ATELIERS MULTIGAMMES	47
FIGURE 6 : DIAGRAMME DES FLUX DE PRODUCTION EN CELLULES DYNAMIQUES	47
FIGURE 7 : 2E CONFIGURATION CELLULAIRE DYNAMIQUE	51
FIGURE 8 : CONFIGURATION POUR LE 4E HORIZON	56

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A. PRÉSENTATION DES CONFIGURATIONS POUR CHAQUE HORIZON DE PLANIFICATION ACCOMPAGNÉES DE LEUR MATRICE PRODUITS/POSTES DE BURBIDGE (PFA).68
ANNEXE B. EXEMPLE DE FORMULATION DE L'ALGORITHME DU COÛT MARGINAL MINIMAL DE CONFIGURATION74
ANNEXE C. CARNET DES COMMANDES EN ORDRE DE NUMÉRO DE PRODUIT85

1. Introduction

Depuis toujours, un des défis des entreprises manufacturières est d'accroître leur rentabilité en maîtrisant leurs processus de fabrication afin d'en exploiter au maximum leurs capacités. C'est ainsi qu'au fil du temps, les modes de production ont évolué du simple artisanat aux systèmes manufacturiers flexibles hautement automatisés en passant par la production de masse en lignes dédiées.

Aujourd'hui, l'ordinateur est pleinement intégré dans la gestion des systèmes manufacturiers et il a permis d'exploiter le potentiel de la recherche opérationnelle afin de repousser les limites à la productivité. Ce mémoire présente un nouveau concept qui repousse encore plus loin l'une de ces limites et enrichit d'un nouveau mode de production les possibilités de flexibilité des entreprises manufacturières particulièrement en contexte d'un environnement turbulent.

Ce nouveau concept introduit la notion du coût d'un réaménagement dans la détermination de la configuration des installations industrielles en fonction d'un horizon de planification. Le concept des cellules dynamiques permet d'avoir un système manufacturier hautement dynamique répondant efficacement à un environnement très turbulent. Les **Systèmes Manufacturiers Cellulaires Dynamiques (SMCD)** sont des systèmes qui découlent des mêmes fondements que les cellules virtuelles (McLean, 1982 ; Drolet, 1989 ; Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(1) ; Montreuil, Drolet et Lefrançois, 1992) et réévaluent constamment la configuration physique de la composition des cellules de manière à obtenir la configuration optimale selon les coûts marginaux de manutention et de configuration pour un horizon donné.

Le mode de production est intimement lié aux méthodes de gestion des ressources et à l'organisation physique de l'aménagement. Or, l'objectif d'un aménagement

industriel est de favoriser les flux de production en minimisant, voire en éliminant, la manutention. Ainsi, le choix du mode de production devient stratégique sachant qu'il influencera toute l'organisation et la performance de l'entreprise.

Dans un contexte de mondialisation des marchés où la concurrence devient imprévisible et où la diversité des produits est en prolifération au détriment du volume et du cycle de vie, les entreprises manufacturières tentent de maintenir leur rentabilité tout en cherchant à accroître leur flexibilité afin de toujours mieux répondre à leur marché en évolution. C'est dans un tel environnement que ces entreprises doivent choisir le mode de production leur permettant de rencontrer ce besoin de flexibilité qui leur assurera la pérennité.

1.1 Environnement turbulent

Hayes et Pisano (1994) soutiennent que les entreprises manufacturières sont exposées à un environnement de plus en plus complexe où tout est en perpétuel changement. Ces entreprises évoluent dans un environnement extrêmement dynamique qui exige une grande flexibilité et une capacité d'adaptation. Cet environnement est qualifié de turbulent car, il engendre de profondes perturbations et turbulences dans l'organisation des entreprises.

Des chercheurs ont analysé les performances d'une production en présence de certaines caractéristiques d'un environnement turbulent. Pour des systèmes cellulaires, un tel environnement entraîne un débalancement des flux inter et intracellulaires causant des perturbations dans les temps de passage moyens, le respect des dates dues et les relations entre les équipes de travail (Greene et Cleary, 1985). Un environnement turbulent amène aussi des problèmes d'ordonnancement et d'organisation des cellules pratiquement insolubles (Irani, 1993).

Le besoin de se doter d'une stratégie manufacturière est donc devenu une nécessité dans un environnement de plus en plus turbulent. Selon Hayes et Pisano (1994), les priorités compétitives d'une entreprise dépendent de la maturité de ses

produits/procédés. Lorsqu'un produit est au début de son cycle de vie, le procédé doit être en mesure de répondre rapidement aux modifications de design. Il doit également être en mesure de produire en petits lots de production. Dans ce cas, le but de l'entreprise est d'opter pour la flexibilité stratégique. Par contre, lorsqu'un produit a atteint sa maturité, la stratégie sera plutôt de produire des grands volumes à coût minimum.

Certains chercheurs ont intégré les contraintes de turbulence dans leur approche. L'étude de Ramhudin et Rochette (1991) a évalué le comportement en Juste-à-Temps d'une cellule composée de sept stations flexibles qui subissait des variations dans la taille des lots, des temps de production et des temps de montage. Ils ont conclu que le Juste-à-Temps pouvait être bénéfique dans un tel environnement.

Les recherches de Rajamani, Singh et Aneja (1992) ont démontré qu'il est favorable d'utiliser un plan de production répétitif lorsqu'une demande est imprévisible, sporadique mais récurrente dans un procédé stable et pour un mixte de produits constant (ex. : un producteur de boissons gazeuses).

Le concept qui semble avoir le mieux intégré toute la dynamique d'un environnement turbulent est le concept des cellules virtuelles. Les recherches sur ce concept démontrent qu'il est capable d'accroître la flexibilité des systèmes manufacturiers, en particulier pour les FMS (*Flexible Manufacturing Systems*) (Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(1) ; Drolet, 1989, Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(2) ; Montreuil, Vankatadri et LeFrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992 ; Harvey, 1992 ; Irani, 1993). En fait, les cellules virtuelles permettent une réponse toute aussi dynamique que l'environnement lui-même.

En combinant l'ensemble de ces recherches, il est possible de préciser les caractéristiques d'un environnement turbulent. Voici donc les 7 caractéristiques qui, selon notre définition, constituent un environnement turbulent:

1. La variabilité de la taille des lots de production et de la demande (Montreuil, Vankatadri et LeFrançois, 1991 ; Ramudhin et Rochette, 1991; Irani, 1993)
2. La variabilité des temps opératoires (Irani, 1993)
3. La variabilité des temps de mise en course (Ramudhin et Rochette, 1991)
4. Une demande totalement ou pratiquement imprévisible (Montreuil, Vankatadri et LeFrançois, 1991 ; Rajmani, Singh et Aneja, 1992; Hayes et Pisano, 1994)
5. La variabilité du mixte de produits, voire des productions uniques (Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987; Irani, 1993; Montreuil *et al*, 1993)
6. Les jalonnements variés d'opérations (Irani, 1993; Montreuil *et al*, 1993)
7. Une compétition imprévisible (Hayes et Pisano, 1994).

1.2 La recherche de flexibilité

La flexibilité est une notion complexe et difficile à cerner. On peut lui donner des définitions très générales ou spécifiques. Hayes et Pisano (1994) définissent la flexibilité comme étant la capacité de répondre aux fluctuations du marché et des changements de design. Pour y arriver, il faut des employés hautement qualifiés, de la machinerie très versatile et d'utilité générale afin d'être capable de produire en petits lots (Drolet, 1989 et Hayes et Pisano, 1994).

Dans l'essai d'Harvey (1992), on retrouve une typologie précise et détaillée de divers types de flexibilité. Il identifie 7 types de flexibilité qui se résument comme suit ;

1. la flexibilité des machines: la capacité à faire plusieurs opérations différentes sans effort considérable pour changer d'opération.

2. La flexibilité de l'équipement de manutention: la capacité à déplacer différents types de pièces.
3. La flexibilité opérationnelle: le nombre de façons différentes de fabriquer une pièce. Cette flexibilité est possible principalement lors de la conception et se distingue de la flexibilité de routage du fait qu'elle représente la capacité de fabriquer selon des standards ou des familles de pièces déjà en place.
4. La flexibilité de produits: la capacité à modifier le mixte de produits. Cette flexibilité dépend des trois précédents types de flexibilité, ainsi qu'un aménagement adéquat afin de faciliter l'intégration de nouveaux produits ou l'exclusion de produits obsolètes.
5. La flexibilité de volume de production: la capacité de produire à différents volumes et surtout en petits lots.
6. La flexibilité de routage: la capacité qu'un produit puisse suivre différents routages.
7. La flexibilité d'expansion: la facilité avec laquelle la capacité et les caractéristiques de production du système peuvent être augmentées ou modifiées lorsque nécessaire.

De plus, les moyens suggérés par Harvey pour obtenir ces flexibilités consistent surtout à miser sur une technologie hautement sophistiquée et automatisée, la CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur), un aménagement adéquat et un système de contrôle central très performant pour coordonner les opérations. Néanmoins, il faut souligner que l'être humain reste pour le moment la ressource démontrant le plus ces flexibilités.

Il y a aussi d'autres définitions de la flexibilité comme celle de Chen et Chung (1991). La flexibilité permettrait de prolonger le temps de service d'un aménagement et de le rendre en mesure de répondre rapidement et économiquement aux changements dynamiques du marché.

Dans le cas précis des cellules manufacturières, la flexibilité du système est la capacité qu'une pièce puisse être attribuée à plusieurs cellules (Greene et Sadowski, 1984 ; Greene et Cleary, 1985).

Cependant, malgré les différentes définitions que l'on donne à la flexibilité, elles se résument en la capacité de s'adapter aux changements dans l'environnement sans dépenser une énergie considérable. L'évolution des marchés a ainsi poussé les entreprises à opter pour des modes de production de plus en plus dynamiques.

1.3 Évolution des modes de production

1.3.1 Les systèmes manufacturiers

Le choix d'un mode de production tel qu'illustré à la Figure 1 dépend principalement de deux variables, la variété des produits et le volume de production. Lorsqu'il y a très peu de produits et que le volume de production est très élevé, une production en ligne de produit est toute indiquée (Tompkins et White, 1984 ; Francis, McGinnis et White, 1992). À l'inverse, s'il y a une grande variété de produits et un volume de production très faible, il est préférable de fonctionner en ateliers multigammes (Greene et Sadowski, 1984 ; Tompkins et White, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Drolet, 1989 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Lorsque la variété et le volume sont moyens, la production en cellules est la plus appropriée, que les cellules soient classiques (Greene et Sadowski, 1984 ; Tompkins et White ; 1984, Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Chobineh, 1988 ; Francis, McGinnis et White, 1992), en FMS (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Masuyama, 1985 ; Mukhopadhyay, Maiti et Garg, 1991) ou virtuelles (Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(1) ; Drolet, 1989 ; Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(2) ; Montreuil, Vankatadri et LeFrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992 ; Harvey, 1992 ; Irani, 1993).

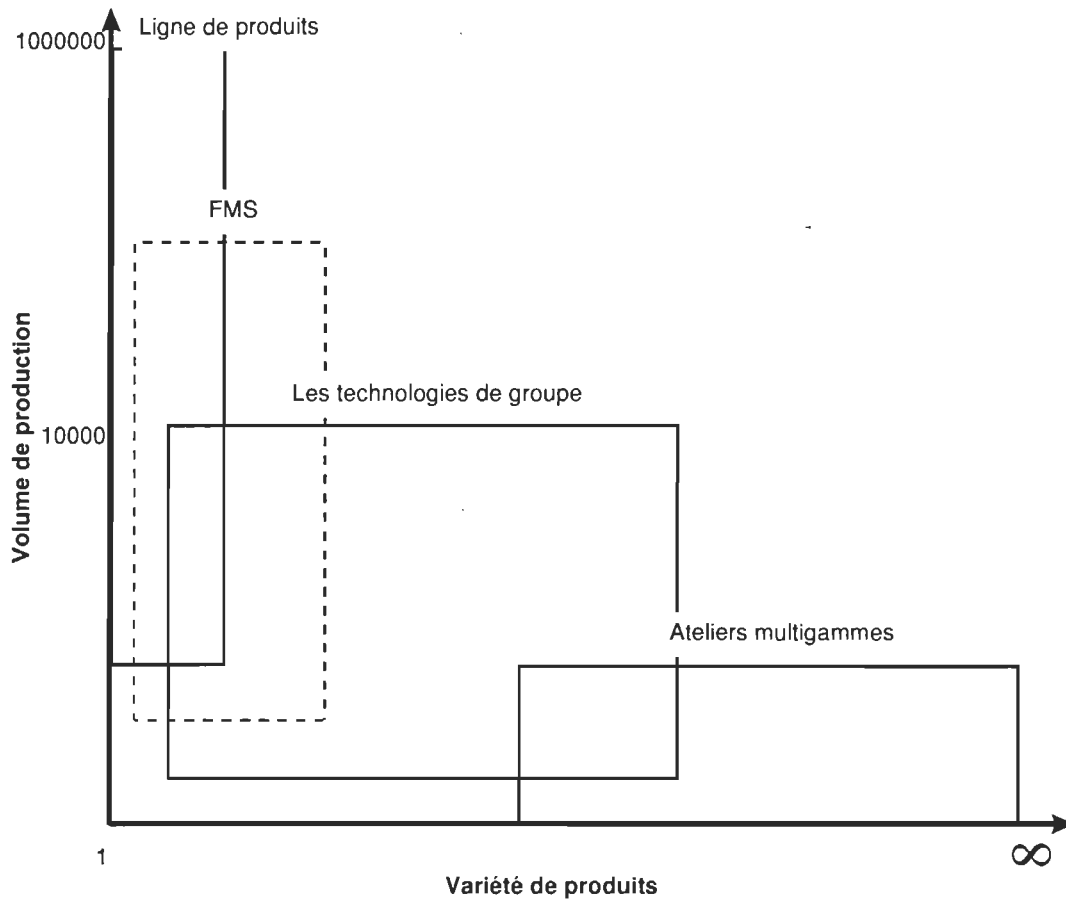


Figure 1: Relation entre le volume de production et la variété de produits

1.3.2 Les ateliers multigammes

Les ateliers multigammes sont le mode de production le plus vieux et le mieux connu. Ils sont très faciles à implanter. Comparativement aux autres modes de production, il s'agit de regrouper chaque type de procédé en département (Tompkins et White, 1984 ; Drolet, 1989 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Les produits sont transportés en lots d'un département à l'autre, selon leur cheminement, occasionnant une manutention interdépartementale intensive (Greene et Cleary, 1985 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Cette manutention entraîne une augmentation considérable des temps de passage pouvant atteindre dans certains cas des semaines (Greene et Cleary, 1985). C'est pourquoi il existe des techniques qui tentent de

réduire le plus possible la manutention interdépartementale en optimisant l'emplacement des départements (Tompkins et White, 1984 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Les conséquences d'un aménagement en ateliers multigammes sont un niveau élevé d'encours, une diminution de la surface de production pour l'entreposage des tampons, des temps de passage très longs, des taux de rejets plus élevés et des coûts de manutention considérables (Tompkins et White, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Drolet, 1989 ; Francis, McGinnis et White, 1992). De plus, il est préférable d'utiliser des équipements très versatiles et d'utilité générale (Drolet, 1989 ; Hayes et Pisano, 1994).

Tompkins et White (1984) ont proposé un concept plus flexible d'ateliers multigammes dans les cas où la vie des produits est courte et les modifications de design sont fréquentes (Tompkins et White, 1984 ; Drolet, 1989). Il s'agit de l'aménagement modulaire. Les départements sont considérés comme des modules reconfigurables disposés de chaque côté d'une allée centrale que l'on nomme « *Spine* » ou allée spinale. Ce type d'aménagement est donc très flexible en ce qui a trait aux produits et à l'expansion.

1.3.3 La production en ligne de produit

La production en ligne de produit est apparue dès le début du siècle avec Ford. Celle-ci constitue le mode le plus efficient mais le moins flexible de tous les modes de production. Il est fortement recommandé lorsqu'il y a très peu de variété de produits et une grande demande (Greene et Sadowski, 1984 ; Tompkins et White, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Drolet, 1989 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Pour rendre plus flexible une ligne de produit, certains ont opté pour les FMS (Masuyama, 1985). L'utilisation des principes des technologies de groupes a favorisé la standardisation de la conception des produits facilitant ainsi l'introduction des nouveaux produits grâce à l'intégration des FMS dans les lignes de

produits. Ils sont parvenus à produire de plus petits lots de chaque produit d'une même famille.

À une autre échelle, les cellules manufacturières et les FMS sont idéalement aménagées en petite ligne de produits à l'intérieur des cellules (Greene et Sadowski, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Francis, McGinnis et White, 1992). Cependant, toutes formes de ligne de production ont très peu de flexibilité d'expansion (Masuyama, 1985 ; Harvey, 1992).

1.3.4 Les cellules de production

Le concept des systèmes cellulaires fut développé à partir des principes des technologies de groupe proposés par les russes Sokolovski et Mitrofanov. Ces principes se résument ainsi: « Les choses similaires devraient se faire similairement », c'est-à-dire qu'il s'agit de regrouper des pièces de conception similaire ensemble, appelé famille de produits, afin de les fabriquer ensemble ou successivement réduisant ainsi les temps de mise en course et leur temps de passage (Askin et Standridge, 1993 ; Drolet, Abdounour et Rheault, 1996).

Les technologies de groupes sont donc des stratégies qui cherchent à exploiter économiquement les similitudes dans la conception et la fabrication des produits (Harvey, 1992). Elles se résument en trois stratégies (Greene et Cleary, 1985):

1. La classification et le codage
2. Le design des mises en course
3. Les cellules manufacturières

Ces stratégies sont indépendantes et n'ont pas de préséance les unes par rapport aux autres. En effet, la classification et le codage ne sont pas préalables à la formation d'une cellule.

Le concept a évolué avec l'apparition des premières machines à contrôle numérique. Ainsi, en plus de regrouper les produits en familles, ces familles étaient produites

entièrement à l'intérieur de regroupements de machines nommés cellules. Greene et Sadowski (1984) donnent une définition qui se traduirait comme suit:

« Le mode manufacturier cellulaire est la division physique des équipements manufacturiers en cellules de production. Chaque cellule est configurée pour produire une famille de pièces. Une famille de pièces se définit comme un ensemble de pièces utilisant des équipements, outillages et/ou des gabarits et des matrices similaires. Normalement, les pièces d'une famille sont transformées de la matière première aux pièces finies à l'intérieur d'une seule et même cellule. Généralement, une usine ne peut être entièrement divisée en cellules spécialisées. Ainsi, une portion de l'usine restera aménagée en ateliers multigammes fonctionnels que l'on appelle la cellule résiduelle. »¹

Cette précieuse définition résume tout l'enjeu des cellules manufacturières. En fait, la tâche la plus complexe est de définir la composition des familles et des cellules. Plusieurs chercheurs ont tenté de développer des modèles et des heuristiques afin de trouver des solutions optimales selon divers critères de performance. Cependant, la recherche d'une solution optimale est presque impossible puisqu'il s'agit d'un problème NP-complet. C'est-à-dire que les résolutions du regroupement des machines ; de la formation des familles de produit ; des duplications des machines ; de l'aménagement intracellulaire et de l'aménagement intercellulaire sont des problèmes

¹ Traduction libre de la définition de Green et Sadowski (1984), « Cellular Manufacturing Control », Journal of Manufacturing System, Vol. 2, No 2, p. 137-145

dont la complexité croît exponentiellement pour chaque contrainte et variable incluse (Irani, 1993). C'est pour cette raison qu'il n'y a pratiquement que des heuristiques qui ont été développées pour les solutionner.

On peut formuler la formation des familles et cellules de produit par une approche matricielle ou par programmation mathématique (Kusiak et Heragu, 1987). Parmi les heuristiques matricielles, il y a la PFA (*Production Flow Analysis*) de Burbidge (Greene et Cleary, 1985) appelée aussi la matrice standard pièces/machines généralisée (Kusiak et Heragu, 1987). Cette technique est de loin la plus utilisée et la plus simple des heuristiques employées. Elle se base exclusivement sur les routages des produits. Cependant, elle ne donne pas toujours de solutions utilisables et néglige plusieurs aspects reliés à la performance d'une cellule comme la demande, les coûts de production, les temps d'opération et les temps de montage par exemples (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 et Currie, 1992).

La matrice standard pondérée (Kusiak et Heragu, 1987) est une variante de la PFA qui utilise une pondération intégrant d'autres aspects que le routage des produits. Dans la même logique d'une pondération matricielle, la méthode IAC (Interaction - Activation - Compétition) développe une matrice pondérée à partir d'un réseau neuronal artificiel (Currie, 1992). Cette approche est capable d'intégrer une grande variété de variables et donc, de fournir une solution quasi optimale. Cependant, il s'agit d'une technique très complexe nécessitant un haut degré d'informatisation.

Parmi les formulations par programmation mathématique, on peut mentionner la programmation linéaire et quadratique (Kusiak et Heragu, 1987). Ces formulations forment à la fois les familles et les cellules. Il y a certaines heuristiques qui ont une formulation en deux phases comme l'heuristique de Choobineh (1988) qui utilise une programmation linéaire pour chaque phase.

Il existe encore plusieurs approches pour la formation des familles et des cellules mais, selon Greene et Cleary (1985) et Kusiak et Heragu (1987), c'est l'heuristique de Burbidge qui reste la méthode la plus simple et la plus satisfaisante.

L'aménagement des cellules manufacturières dépend de l'homogénéité des séquences des produits d'une même famille. Si cette homogénéité est très forte, alors la cellule devrait être idéalement aménagée en ligne de produit (cellule produit). Cependant, une même famille peut avoir des séquences d'opération hétérogènes, surtout si la cellule existe depuis un certain temps. Dans ce cas, la cellule sera plutôt aménagée en procédé (cellule procédée) et le flux intracellulaire peut aller dans tous les sens (Greene et Sadowski, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987).

Lorsqu'une cellule vieillie, elle passe d'une cellule produit à une cellule procédé puis, peu à peu, il y aura des échanges intercellulaires. C'est alors que les cellules deviennent désuètes (Greene et Cleary, 1985). Ce phénomène de vieillissement est accéléré et amplifié lorsque le mixte de produits varie beaucoup et qu'il y a des changements fréquents dans les opérations des produits (Kusiak et Heragu, 1987 ; Seifoddini et Djassemi, 1996).

Les avantages des cellules manufacturières sont une réduction de la manutention, de l'outillage, des temps de montage et de leurs fréquences, du traitement des commandes, des stocks d'encours et du temps de passage. En plus, elles améliorent les relations de travail et l'expertise des opérateurs (Greene et Sadowski, 1984 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987).

Par contre, les désavantages sont une augmentation du capital investi par la duplication de certains équipements et une diminution potentielle du taux d'utilisation des machines (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987). Kusiak et Heragu (1987) recommandent d'utiliser des cellules seulement lorsque la plupart des pièces peuvent être regroupées en familles. Cependant, dans la majorité des cas, 30% à 40% des équipements resteront aménagés en ateliers spécialisés que l'on nomme la cellule résiduelle (Greene et Sadowski, 1984 ; Greene et Cleary, 1985).

Il y a un point très intéressant que mentionnent Greene et Cleary (1985) lorsqu'ils expliquent que bien des entreprises ont expérimenté des cellules manufacturières. Souvent, il ne s'agissait que d'une seule cellule produisant qu'une très petite famille de produits et, une fois la production terminée, la cellule était dissoute. Ce fait démontre qu'il existe certains critères économiques qui peuvent justifier la création de cellules manufacturières temporaires puisque, sans cela, aucune entreprise ne les aurait expérimentées de cette façon.

1.3.5 Les Systèmes Manufacturiers Flexibles

Avec l'apparition de l'automatisation, on a pu intégrer les systèmes de manutention aux cellules leur donnant ainsi plus d'autonomie, d'où leur nom de cellules flexibles.

Les FMS sont des systèmes manufacturiers hautement automatisés qui utilisent des machines automatisées, des systèmes de manutention automatisés et des systèmes d'entreposage automatisés. Ils sont souvent configurés en cellules manufacturières car, ainsi, ils sont plus faciles à gérer (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987). Qu'il s'agisse de cellules manufacturières ou de FMS, l'approche pour les configurer est similaire, c'est dans leur développement, leur gestion et dans leur capacité qu'elles diffèrent (Greene et Cleary, 1985, Kusiak et Heragu, 1987).

Les FMS sont justifiés lorsque les produits et l'entreprise ont atteint une certaine maturité sur le marché (Hayes et Pisano, 1994). Stratégiquement, il est alors préférable de viser pour une production à plus grand volume et à un coût minimum par l'automatisation (Jackson et Jones, 1987 ; Mukhopadhyay, Maiti et Garg, 1991 ; Hayes et Pisano, 1994). Bien que les FMS sous-tendent à être très flexibles, ils ont cependant peu de flexibilité d'expansion et de produit face à de nouveaux marchés ou à une amélioration continue des procédés de production (Harvey, 1992 ; Hayes et Pisano, 1994). Il y a de plus en plus de recherche qui démontrent que la performance des FMS ne réside pas dans les investissements technologiques faits, mais dans la façon de les gérer (Jackson et Jones, 1987 ; Chen et Chung, 1991 ; Hayes et Pisano,

1994). Jackson et Jones (1987) ont identifié 3 causes qui détériorent la performance des FMS:

- 1- Manque de standards d'interfaces entre les composantes des FMS.
- 2- Inefficacité des stratégies de planification et d'ordonnancement.
- 3- Pauvre gestion des données et des communications.

Malgré tout le potentiel que représentent les FMS, il n'y a, en fait, que très peu d'entreprises qui pourraient en implanter et encore moins qui parviendraient à bien les gérer. Par conséquent, les FMS ont démontré par l'expérience, qu'il serait plus efficient d'exploiter à fond une technologie de base, que d'exploiter une fraction des capacités d'une technologie de pointe (Chen et Chung, 1991 ; Hayes et Pisano, 1994). Cependant, la technologie ne cesse d'évoluer et l'on voit apparaître des équipements à contrôle numérique de plus en plus conviviaux permettant une meilleure flexibilité de produits et une meilleure intégration.

1.3.6 Les cellules virtuelles

La faiblesse des FMS était dans leur gestion. Malgré que les FMS pouvaient passer d'une pièce à l'autre avec chacune leur cheminement distinct sans difficulté, trop souvent on a continué de les utiliser pour produire en lots en plus d'une configuration physique qui n'avait rien d'efficiente.

Le concept de cellule virtuelle est un concept qui est né de la volonté de mieux exploiter et gérer les FMS. Une cellule virtuelle est un regroupement logique de postes de travail à l'intérieur d'un système informatique et considéré comme une cellule par un contrôleur, mais n'ayant aucune transposition physique quant à l'emplacement des processeurs (Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(1) ; Drolet, 1989 ; Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(2) ; Montreuil, Vankatadri et LeFrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992 ; Harvey, 1992 ; Irani, 1993). Il y a 4 axiomes

sur lesquels reposent les fondements de ce concept (Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992):

1. *Des processeurs spatialement dispersés peuvent constituer une cellule de production.*
2. *La durée de vie d'une cellule de production est une variable décisionnelle variant de l'éphémère à l'éternel.*
3. *Un processeur peut simultanément faire partie de plus d'une cellule.*
4. *Une cellule peut faire partie d'autres cellules.*

Jusqu'à maintenant, il y a eu très peu de recherches concernant les cellules virtuelles. Entre autres, Drolet (Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(1), Drolet, 1989, Drolet, Montreuil et Moodie, 1989(2)) développa le premier modèle de planification de la production à partir de cellules virtuelles. Il s'agit d'un modèle de programmation linéaire. Le système réagit dynamiquement à chaque écart de la planification, ce qui en fait un système très flexible et sensible aux variations de l'environnement.

Les autres recherches sur les cellules virtuelles ont surtout concerné l'aménagement des installations afin de tirer pleinement profit des cellules virtuelles. Montreuil, Vankatadri et LeFrançois (1991) ont développé un aménagement pouvant opérer dans un environnement très volatile. Cet aménagement, appelé aménagement holographique, consiste à éparpiller les machines dans l'usine au lieu de les regrouper, de façon à ce qu'un type de machine soit, proportionnellement aux taux d'échanges, à proximité de tous les autres types de machine. Cependant, ce type d'aménagement entraîne une duplication des machines.

L'autre type d'aménagement, développé par Irani (1993), cherche au contraire à réduire les duplications des machines. Cet aménagement s'appelle le MSA (*rooted Maximal Spanning Arborescence*). Les cellules se résument à des routages disposés en arbre pour former un réseau série-parallèle où les noeuds correspondent à des machines-goulots qui sont partagées au lieu d'être dupliquées. Bien que cet

aménagement semble être plus concret que l'aménagement holographique, il possède beaucoup moins de flexibilité d'expansion, car il peut nécessiter une reconfiguration complète de l'usine lorsqu'un nouveau produit ne peut circuler adéquatement dans le réseau.

L'avantage des cellules virtuelles sur les autres systèmes manufacturiers est qu'elles rendent le système capable de s'adapter aux perturbations. Elles sont extrêmement flexibles et peuvent s'implanter dans divers aménagements. Il apparaît donc clairement que le concept de cellules virtuelles puisse répondre efficacement à un environnement turbulent. Montreuil, Drolet et LeFrançois (1992) affirment que les cellules virtuelles seraient optimales dans un contexte où des processeurs seraient mobiles.

Cependant, il y a certaines contraintes aux cellules virtuelles. Puisque les cellules ne sont que logiques et connues que du système informatique, cela exige un haut niveau d'informatisation et de communication (Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992 ; Harvey, 1992) entre tous les processeurs de la production. Ceci est principalement dû au fait qu'il n'y a pas de lien physique à l'intérieur de la cellule et que celle-ci n'est pas autonome.

1.4 Le cycle de vie d'un aménagement

Chen et Chung (1991) résument parfaitement ce que l'on recherche dans un aménagement lorsqu'ils affirment que la flexibilité permettrait de prolonger le temps de service d'un aménagement et de le rendre en mesure de répondre rapidement et économiquement aux changements dynamiques du marché. En fait, un aménagement doit être maintenu le plus longtemps possible.

Cette préoccupation se fonde sur le principe implicite qu'un équipement ne se déplace pas. Or, il s'agit d'un paradigme qui s'applique systématiquement lors de l'évaluation d'un aménagement ou même lors de la conception des équipements de production. Pourtant, un équipement est toujours déplaçable à un coût donné. En

appliquant ce changement de paradigme dans les stratégies d'aménagement, il ouvre une nouvelle compréhension des enjeux et des solutions à envisager quant à la durée de vie utile de l'aménagement.

1.4.1 La relation Productivité/Flexibilité

Si on reprend la relation entre la productivité et la flexibilité présentée à la Figure 1, on note qu'il n'y a pas de notion de la durée de vie des produits ou de l'aménagement, or ce facteur peut influencer grandement la variété des produits ou le volume de production à considérer. Ainsi, un aménagement que l'on planifie pour une période de 5 ans demande d'anticiper la demande pour les 5 prochaines années en volume et en variété, ce qui, en contexte d'un environnement turbulent, est quasi impossible. Plus l'horizon de planification de l'aménagement sera court, plus restreint sera la variété et le volume de production à considérer. Cette constatation amène l'introduction d'un 3^e axe à la représentation de la Figure 1.

1.4.2 Un 3^e axe: Le cycle de vie de l'aménagement

Pour la compréhension de ce mémoire, nous nous devons d'ajouter ce nouvel axe à cette relation de productivité - flexibilité présentée à la Figure 2. Cet axe représente le ratio du cycle de vie moyen des produits sur l'horizon de l'aménagement. Par exemple, ce ratio pour des produits ayant un cycle de vie de 1 an et dont l'aménagement serait prévu pour les 3 prochaines années sera de $1/3$ ou 0.33. Par contre sur un horizon de 6 mois, il sera de 2.

Le cycle de vie est un facteur déterminant dans le choix d'un mode de production et des technologies selon Hayes et Pisano (1994). Selon l'évolution d'un cycle de vie d'un produit, le choix technologique devra être versatile si l'on est dans la phase de développement ou très efficient et plus automatisé si l'on est dans la phase de maturité. De plus, la tendance des marchés mondiaux entraîne une réduction considérable du cycle de vie des produits, que ce soit l'automobile, l'électronique ou

l'aéronautique. Les enjeux des manufacturiers d'aujourd'hui sont d'innover, personnaliser et diversifier leurs produits, ce qui est diamétralement opposé à la production de volumes importants. Ils doivent produire une plus grande variété de produits en petites quantités au prix compétitif de la production de masse. L'introduction du cycle de vie selon l'horizon de l'aménagement permet donc une meilleure analyse afin de choisir le mode de production le plus stratégique.

La Figure 2 présente le graphique en trois dimensions de la productivité - flexibilité - durée de vie d'un aménagement. En observant ce graphique, on note que les modes de production occupent des volumes spécifiques dont la projection de leur aire sur le plan de la productivité et de la flexibilité est identique à la présentation plus traditionnelle présentée à la Figure 1.

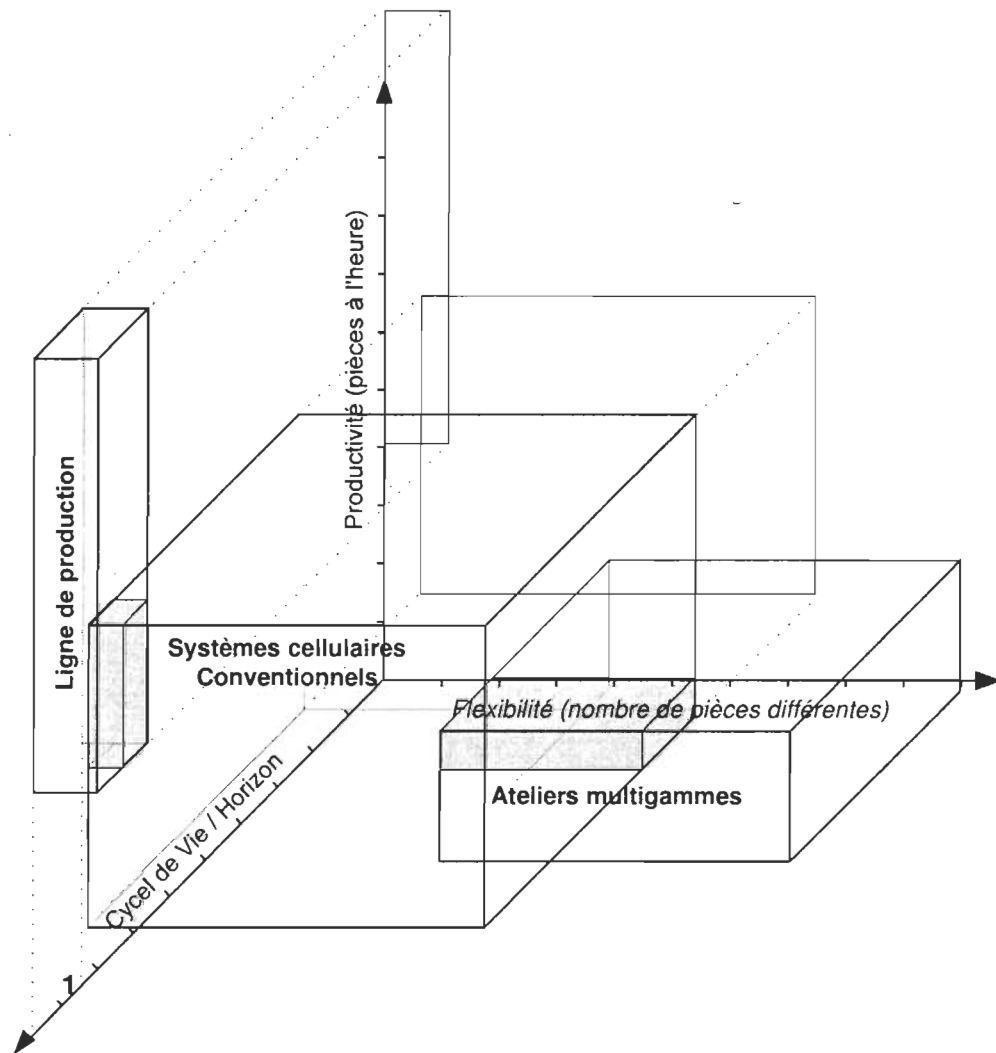


Figure 2: Relation entre productivité, flexibilité et durée d'un aménagement

Ainsi pour justifier un aménagement en ligne de produit, il est souhaitable que le volume de production soit élevé, que la variété des produits soit très faible et que le cycle de vie des produits soit au moins égal sinon plus grand que l'horizon planifié de l'aménagement. À l'inverse, dans le cas où il y a une forte variété de pièces et un faible volume de production, la Figure 2 démontre qu'un aménagement en ateliers multigammes aura la plus grande vie utile puisque le cycle de vie des produits est plus court que l'horizon de l'aménagement. Grâce au graphique productivité - flexibilité - durée de vie de l'aménagement, il devient possible de déterminer le bon

moment pour réaménager les installations industrielles en fonction du mode de production souhaité.

En effet, une entreprise ayant toujours fonctionné en ateliers multigammes à cause de la variété de ses produits pourrait fonctionner en mode cellulaire, si elle réduisait l'horizon de planification de son aménagement de manière à considérer moins de produits à la fois et en réaménageant ses cellules plus souvent. C'est exactement ce que tend à faire le concept des cellules dynamiques.

2. Concept théorique

2.1 Le concept des cellules dynamiques

Les travaux de Greene et Cleary (1985) et de Kusiak et Heragu (1987) soulignent que plusieurs entreprises ont expérimenté des cellules manufacturières mais qu'il ne s'agissait souvent que d'une seule cellule produisant une très petite famille de produits et, une fois la production terminée, la cellule était dissoute. Ceci tend à démontrer qu'il existe certains critères économiques qui peuvent justifier la création d'une cellule manufacturière temporaire. Plus précisément, il était évident pour ces entreprises que les coûts de configuration cellulaire étaient moindres que les coûts qui auraient été engendrés par les coûts de manutentions interdépartementales.

Le concept des cellules dynamiques se fonde justement sur l'affirmation qu'un poste de travail peut être relocalisé lorsque c'est économiquement justifiable de le faire. En combinant cette dernière affirmation aux 2 premiers axiomes des cellules virtuelles (Drolet, 1989 ; Montreuil, Drolet et LeFrançois, 1992), présenté à la section 1.3.6, qui sont:

1. Des postes de travail physiquement dispersés peuvent constituer une cellule ;
2. La durée de vie d'une cellule est une variable décisionnelle qui peut varier de l'éphémère à l'infini ;

on définirait les cellules dynamiques comme étant des cellules de production physiquement reconfigurables de manière à minimiser les coûts marginaux de manutention tout en optimisant les flux de production pour un horizon donné (Rheault, Drolet et Abdounour, 1995; Rheault, Drolet et Abdounour, 1996(1); Rheault, Drolet et Abdounour, 1996(2)).

En fait, le concept des cellules dynamiques considère une plus petite variété de produits en réduisant l'horizon planifié de l'aménagement et ainsi, permettre, comme le démontre la Figure 2, l'utilisation des technologies de groupes.

Jusqu'à présent, les algorithmes permettant la configuration de cellules de production, en plus d'être des problèmes NP-complets, étaient plutôt décevants. La plupart des spécialistes considèrent la matrice pièces/machines de Burbidge (la PFA) comme la meilleure heuristique à utiliser, cependant la PFA n'est pas très performante en contexte de cellules dynamiques puisqu'il n'y a pas toujours une solution réalisable. En effet, la PFA ne donne pas la position physique des équipements et il arrive parfois (souvent) qu'elle ne distingue pas des groupes mutuellement exclusifs (Rheault, Drolet et Abdounour, 1996(2)).

C'est en introduisant la notion de poste de travail relocalisable comme nouveau paradigme que le concept des cellules dynamiques a pris forme. Ainsi, en intégrant la notion d'un coût de reconfiguration tenant compte d'un aménagement initial, cela a permis l'élaboration d'un algorithme fournissant toujours une solution réalisable. Cet algorithme est la pierre angulaire du présent mémoire et il a permis aux cellules dynamiques de passer du concept philosophique à un mode de production concret : Les Systèmes Manufacturiers Cellulaires Dynamiques (SMCD).

2.1.1 La mobilité des équipements et des postes de travail

Les SMCD définissent la disposition des équipements et des postes de travail à l'intérieur de zones afin de former des cellules de production. La disposition des équipements dans une zone est fonction de trois facteurs :

1. Leur manutention ;
2. Les servitudes et alimentations disponibles et
3. Leur environnement.

2.1.1.1 La manutention des équipements lors de la configuration des cellules

Déplacer un poste de travail peut être aussi simple que de déplacer une table, un banc et quelques outils manuels ou pneumatiques. Mais parfois, cela peut exiger des équipements et des ouvriers très spécialisés (ex. : une grue, des électriciens ou électroniciens, etc.). Proportionnellement à la complexité du transport et de la réinstallation du poste de travail, le temps d'arrêt de production peut engendrer une pénalité qui se traduit en perte financière. De plus, certains appareils peuvent subir un dérèglement lors du transport nécessitant une recalibration avant leur mise en service, ce qui entraîne d'autres coûts. Cependant, dans l'évolution d'une entreprise, rare seront les appareils qui ne seront jamais déplacés. Un jour ou l'autre, on finira par faire un réaménagement ou un déménagement lorsque la vie utile de l'aménagement en cours sera dépassée.

Une entreprise qui adopte un mode de production cellulaire dynamique mise sur la mobilité et adapte ses équipements pour accroître leur facilité de déplacement afin de réduire les temps de configuration. Au même titre que les méthodologies de réduction de temps de mise en course, cette entreprise appliquera des méthodes de réduction des temps de configuration. Ainsi, les installations seront munies de systèmes d'alimentation à connexions rapides, de systèmes d'ancrages flexibles et d'interfaces standardisés de manutention.

2.1.1.2 Les servitudes et les alimentations disponibles

Pour qu'une machine fonctionne, il lui faut un minimum de servitudes telles que ; par exemple, l'électricité, l'air comprimé, l'eau, une ventilation, un pont roulant, etc. Or, il peut y avoir des zones qui ne possèdent pas certaines des servitudes ou des alimentations requises pour certains postes de travail. En fait, ce sont des contraintes qui peuvent être prises en compte dans un SMCD, il suffit d'intégrer les coûts requis pour l'installation de ces servitudes dans la détermination des coûts de configuration de ces équipements dans ces zones.

2.1.1.3 L'environnement des postes de travail

Un SMCD doit considérer l'impact d'un environnement agressif pour un poste de travail. Ainsi, des équipements peuvent nécessiter des conditions particulières (sans poussière, humidité contrôlée, ventilation, bruit, etc.). Il est toujours possible d'obtenir des conditions environnementales à un coût donné.

En ce qui a trait à l'incompatibilité de postes de travail entre eux, il s'agit d'une contrainte réelle qui doit être considérée à chaque reconfiguration.

La mobilité des postes de travail se résume simplement par la détermination des coûts nécessaires pour localiser un poste de travail d'une zone à une autre zone compte tenu des autres postes de travail à l'intérieur de la même zone. Par conséquent, les équipements n'ont pas tous la même mobilité. Certains ne se déplaceront pratiquement jamais et deviendront alors des pivots autour desquels les autres équipements s'aggloméreront relativement à l'importance de leurs échanges entre eux.

2.1.2 Le regroupement des postes par zone physique

On considère une zone comme étant une région logique ou physique du plancher de production. Contrairement à un département ou à une cellule, une zone est une section du plancher pouvant contenir potentiellement n'importe quel poste de travail selon l'espace disponible. Théoriquement, une zone n'est dédiée ni à une famille de produits, ni à un type de procédé.

Une zone devrait être suffisamment grande pour contenir une cellule de production complète et devrait être suffisamment petite pour que les variations du flux intrazone ne soient pas significatives en comparaison aux flux interzones. Cependant, une cellule peut être répartie sur plusieurs zones et une zone peut contenir plus d'une cellule.

Le nombre de postes de travail que devrait contenir une cellule est une variable décisionnelle que l'entreprise doit définir en fonction de la nature de ses opérations. Cependant, la littérature suggère que la taille d'une cellule peut varier de 2 à 15 postes de travail (Greene et Cleary, 1985). Mais la performance d'une cellule tend à diminuer lorsqu'elle possède plus de postes de travail.

2.2 Un système manufacturier cellulaire dynamique

Ainsi, les cellules dynamiques s'intègrent dans un système manufacturier hautement dynamique qui doit être sensible à son environnement. Un système manufacturier cellulaire dynamique possède donc l'habileté à réagir aux changements et aux impondérables en adaptant la configuration des installations industrielles selon ses nouvelles contraintes.

Une des caractéristiques des SMCD est la nécessité d'avoir une rétroaction afin de corriger tous les écarts significatifs relativement à l'ordonnancement de la production. On peut représenter un SMCD comme une boucle fermée composée de 4 modules, voir Figure 3.

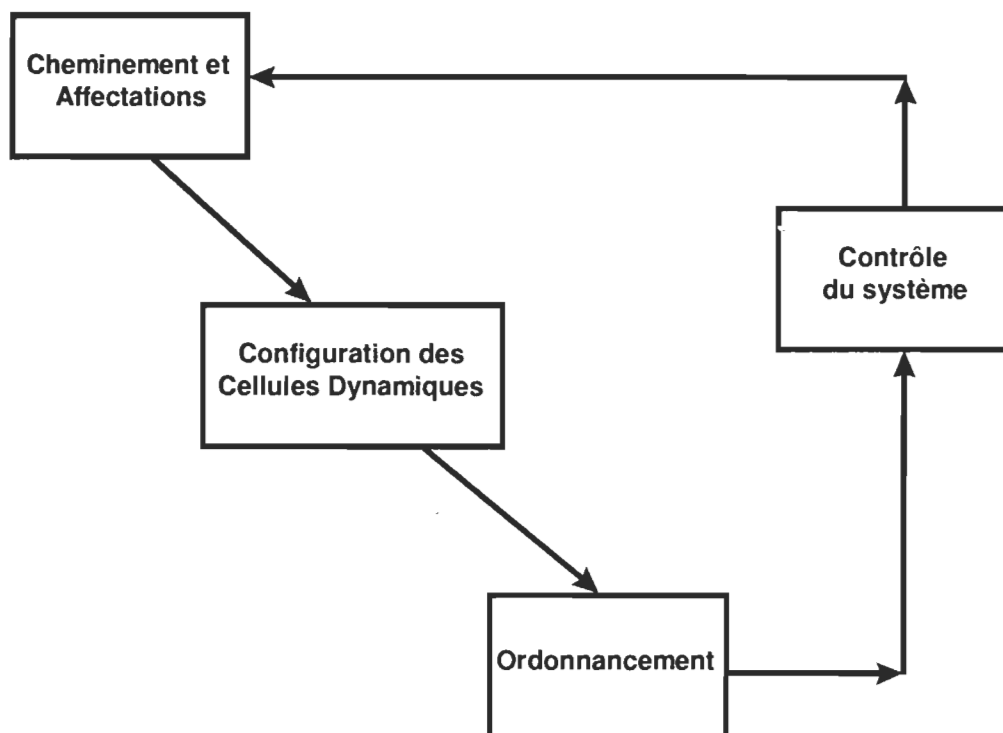


Figure 3: Le système manufacturier cellulaire dynamique

2.2.1 Le module de cheminement et d'affectation

Le module « cheminement et affectation » détermine le routage des produits en considérant la capacité des équipements, la similarité des ajustements ou des opérations, etc. En fait, il existe plusieurs études qui ont couvert le sujet (Greene et Sadowski, 1984; Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987; Chobineh, 1988; Rajmani, Singh et Aneja, 1992; Drolet, Montreuil et Moodie, 1995). Les modèles proposés dans ces études peuvent être utilisés relativement aux performances désirées et favorables au contexte de l'entreprise (Chen et Chung, 1991 ; Ruben, Mosier et Mahmoodi, 1993).

2.2.1.1 Les familles dynamiques

L'attribution de pièces à des équipements spécifiques doit considérer les similitudes de manière à définir dynamiquement des familles ou des sous familles (Greene et

Cleary, 1985). Cependant, comme l'aménagement change constamment, il peut être parfois nécessaire de choisir un compromis entre la similitude des mises en course et la proximité des équipements. Ainsi, au même titre que les cellules dynamiques, la composition des familles serait dynamique selon le mixte des produits pendant l'horizon de planification. Il s'agit là d'un champ de recherche intéressant à approfondir, mais qui n'est pas traité dans ce mémoire.

Ce module agit comme un prétraitement réévaluant les cheminements, les attributions et les taux d'utilisation des équipements avant chaque reconfiguration des cellules dynamiques. De plus, il recalcule la matrice des coûts de configuration de chaque poste de travail dans chacune des zones compte tenu de l'aménagement courant. Le principal extrant s'exprime en nombre d'échanges entre les postes de travail pour chaque produit. Bien que ce module influence grandement le niveau de performance du système, il n'est pas approfondi par le présent mémoire. Il s'agit en fait d'un champ de recherche complet qui se trouve hors des limites couvertes par ce mémoire. Pour les besoins de la cause, nous considérerons qu'il n'y a pas de routage alternatif et, par conséquent, nous minimiserons l'implication du 1^{er} module.

2.2.2 Le module de configuration des cellules dynamiques

Le module de configuration des cellules dynamiques détermine le meilleur emplacement pour l'ensemble des postes de travail à l'intérieur des zones. Il s'agit d'une évaluation basée exclusivement sur des critères économiques comme les coûts de manutentions interzones et les coûts de déplacements des postes de travail. Plus précisément, le modèle utilisé cherche à réduire le coût marginal total de toutes les manutentions de produits et de postes de travail à l'intérieur de l'horizon de planification à partir d'une programmation en nombres entiers.

Le problème d'affectation des postes de travail dans des zones est un problème d'optimisation en nombres entiers formulé généralement comme un problème d'assignation quadratique (PAQ) (Francis, McGinnis et White, 1992). Cependant, un

PAQ est plus facile à formuler qu'à résoudre. Cette difficulté a été contournée en transposant les variables quadratiques en une série de contraintes.

Afin de simplifier le plus possible le problème, on considérera que les échanges intrazones correspondent aux meilleurs flux possibles. Par conséquent, seuls les coûts marginaux des échanges interzones seront considérés. La disposition des postes de travail à l'intérieur des zones ne sera pas considérée non plus, puisque, étant donné leur proximité, leur disposition n'affecte pas significativement la performance du système. De plus, vu le nombre limité de postes de travail à l'intérieur des zones, il s'avère que leur disposition est triviale. Les travaux de DeLaney et al (1995) explorent davantage les différentes configurations intracellulaires pouvant être utilisées.

2.2.2.1 L'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules

La formulation quadratique de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques est :

$$\text{MIN} \sum_k \sum_z (CG_{kz} * X_{kz}) + \sum_p \sum_k \sum_l (CM_{pkl} * E_{pkl} * X_{kz} * X_{lw} * d_{zw}) \quad (1)$$

Sujet à:

$$\sum_k u_k X_{kz} \leq U_z \quad \forall z \quad (2)$$

$$\sum_z X_{kz} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$X_{kz} + X_{lz} \leq 1 \quad \forall z \quad (4)$$

La formulation linéaire de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques est :

$$\text{MIN} \sum_k \sum_z (CG_{kz} * X_{kz}) + \sum_p \sum_k \sum_l (CM_{pkl} * E_{pkl} * D_{kl}) \quad (5)$$

Sujet à:

$$\begin{aligned} \sum_k u_k X_{kz} &\leq U_z && \forall z \\ \sum_z X_{kz} &= 1 && \forall k \\ M(X_{kz} + X_{lw} - 2) + d_{zw} &\leq D_{kl} && \forall z, \forall w, \forall E_{pkl} > 0 \\ X_{kz} + X_{lz} &\leq 1 && \forall z \end{aligned} \quad (6)$$

Les variables et les paramètres sont:

- k un poste de travail ;
- z une zone ;
- l le poste de travail suivant ;
- w la zone pouvant contenir le poste de travail suivant l ;
- p un produit ;
- X_{kz} variable binaire valant 1 si le poste de travail k est dans la zone z, 0 autrement ;
- X_{lw} variable binaire valant 1 si le poste de travail suivant l est dans la zone w, 0 autrement ;
- CG_{kz} le coût de configuration du poste de travail k dans la zone z ;
- CM_{pkl} le coût de manutention d'un lot de transfert du produit p entre les postes k et l par unité de distance ;
- E_{pkl} le nombre d'échanges du produit p entre les postes k et l ;
- d_{zw} la distance entre les zones z et w ;
- D_{kl} la distance entre la zone contenant le poste de travail k et la zone contenant le poste de travail l ;

- u_k l'espace requis par le poste de travail k dans une zone ;
- U_z l'espace disponible de la zone z ;
- M un très grand nombre (millier, million, etc.).

La fonction principale (équations 1 et 5) minimise la somme des coûts de configuration des postes de travail dans les zones, ainsi que les coûts de manutentions interzones des lots de transfert pour l'horizon de planification. Comme il s'agit d'une approche dynamique, les coûts de configuration (CG_{kz}) sont recalculés avant chaque activation du modèle selon la localisation des postes de travail. Le nombre d'échanges des produits (E_{pkl}) est défini par le module précédent.

Cette fonction est limitée par au moins trois séries de contraintes. La première série (2) s'assure que l'espace requis par le nombre de postes de travail ne dépasse pas la capacité des zones. La deuxième série (3) voit à ce que chaque poste de travail soit assigné à une et une seule zone. La troisième série de contraintes (6) est la formulation qui a permis la transposition du PAQ en un problème de programmation en nombres entiers. Pour chaque paire de postes de travail ayant au moins un échange, la valeur de D_{kl} est définie par la condition la plus restrictive qui est lorsque les deux variables X_{kz} et X_{lw} sont à la valeur 1.

Selon le contexte, il est possible d'ajouter des contraintes plus spécifiques. Pour exclure la possibilité que deux postes de travail se retrouvent dans la même zone, il suffit de faire la formulation présentée à l'équation 4. Par contre, pour forcer deux postes à toujours être ensemble, il suffit de les modéliser comme une seule machine. Lorsque l'on veut qu'un poste de travail soit dédié à une zone précise, il suffit d'imposer un coût de configuration nettement plus élevé pour les autres zones.

2.2.2.2 L'élaboration des coûts de configuration

L'établissement des coûts de configuration relève d'une stratégie de coût de revient dont les variables à considérer sont arbitraires. En fait, il peut y avoir de multiples

façons de définir un coût de configuration et chacune peut être pertinente dans un contexte donné. Ces variables peuvent se regrouper selon six catégories principales.

1. **Les frais fixes** : ils consistent aux frais encourus par le déplacement et la réinstallation du poste dans une nouvelle zone indépendamment de la zone et de la distance. Par exemple, le poste doit être déconnecté et connecté par un professionnel qualifié. Définir un frais fixe pour chaque poste est la méthode la plus simple et dans bien des circonstances pourrait être suffisante pour établir des coûts de configuration.
2. **les frais variables** : ils représentent l'autre partie des frais encourus par le déplacement et la réinstallation du poste dans une nouvelle zone selon la distance, le temps et l'équipement de manutention requis. Ils se calculent de façon similaire aux coûts de manutention présentés à la section suivante.
3. **Les pénalités** : lorsque l'on déplace un équipement, il peut s'en suivre des répercussions momentanées à l'ensemble de la production. Ces répercussions peuvent être quantifiables ou non. On peut alors vouloir imposer un coût de pénalité significatif en relation avec l'importance de ces répercussions. C'est ainsi que pour une zone se trouvant à proximité des bureaux administratifs, on imposera une pénalité sévère à l'insertion d'un poste de travail très bruyant. De même, pour maintenir le poste de réception des marchandises à la zone ayant les quais de débarquement, on créera un poste fictif dont les coûts de configuration dans toutes autres zones seront trop élevés pour être retenus comme une solution acceptable.
4. **Les coûts de détérioration** : il s'agit des coûts relatifs à la détérioration de l'équipement due au transfert ou à un dérèglement. En fait, ces coûts représentent un amortissement du vieillissement accru par la manutention des équipements. Parfois, ces coûts peuvent être plus élevés que les autres coûts forçant le maintien de l'équipement dans sa zone initiale.

5. **Les coûts de conditionnement** : ces coûts représentent les coûts nécessaires au conditionnement préalable de la zone pour recevoir le poste de travail. Ces coûts s'appliquent tant et aussi longtemps que le poste n'a pas été déplacé dans la zone. Dès que le poste de travail aura été configuré à l'intérieur de la zone, ces coûts ne s'appliqueront plus dans l'établissement ultérieur des coûts de configuration dans cette zone.
6. **Les coûts de maintien** : plus rares, ils représentent des coûts relatifs au maintien d'un poste de travail à l'intérieur d'une zone.

2.2.2.3 L'élaboration des coûts de manutention

Les coûts de manutention des composantes sont des variables plus communes faisant souvent parties d'une évaluation budgétaire ou du coût de revient des pièces. La plupart des services de comptabilité sont en mesure de fournir les coûts de manutention globale par heure. À partir de ce taux et de la vitesse moyenne d'une manutention incluant les arrêts, il est facile de définir le coût par mètre linéaire à manutentionner.

Certaines entreprises ayant développé leur prix de revient sont en mesure d'élaborer des coûts de manutention plus précis se basant sur le coût de la main d'œuvre de manutention, le coût du matériel de manutention utilisé et l'amortissement des équipements de manutention et de stockage employés. Il est aussi possible d'imputer des coûts dus à l'endommagement moyen lors de la manutention, etc.

2.2.3 Le module d'ordonnancement

L'ordonnancement de la production dans un SMCD relève encore d'études à venir puisqu'il n'y a pas encore de modèle développé spécifiquement pour ce concept. Cependant, l'attribution des postes de travail, le routage des produits et la configuration des cellules dynamiques sont déjà connus pour un horizon donné. Donc, ce module doit élaborer un calendrier de production à partir de ces résultats et

des données concernant les temps d'opération, les temps de mises en course, les temps de déplacement des postes, ainsi que les séquences d'opération. Selon les performances que l'on veut rencontrer (minimiser le temps de passage, respecter les dates dues, etc.), le module emploiera des règles d'ordonnancement soient à un ou deux niveaux (Ruben, Mosier et Mahmoodi, 1993) et calculera le début et la fin de la production des commandes. En plus de déterminer ces moments, ce module doit déterminer à quel instant il sera le plus judicieux de déplacer les postes pour reconfigurer les cellules. Notons qu'à ce niveau, il peut être stratégique d'attendre le plus longtemps possible avant de reconfigurer les cellules, puisqu'il peut y avoir de nouveaux événements forçant une réévaluation des modules précédents et de la planification. Autant que possible, un poste de travail doit être déplacé à un moment qui n'engendre pas un arrêt de production. En fait, ce module joue trois rôles distincts qui se résument ainsi:

1. minimiser les arrêts de production ;
2. fournir au module suivant (le contrôleur du système) les informations lui permettant de suivre l'évolution de la production ;
3. établir un plan de production compréhensible pour le personnel concerné.

DeLanney et al (1995), propose un algorithme permettant de déterminer le meilleur moment pour implanter une cellule en fonction du gain obtenu et du budget d'investissement disponible. La fonction principale adaptée aux SMCD étant :

$$\text{MAX} \sum_z \sum_v p_{zv} b_z (N - v) - \sum_z \sum_k y_{kz} C G_{kz} \quad (7)$$

Sujet à :

$$\sum_k y_{kv} C G_{kv} \leq I_v \quad \forall z \quad (8)$$

Les variables et les paramètres sont :

- v une période ;
- p_{zv} variable binaire valant 1 si la zone z est configurée à la période v , 0 autrement ;
- y_{kv} variable binaire valant 1 si le poste k est déplacé durant la période v , 0 autrement ;
- b_z le bénéfice de configurer la zone z calculé selon la réduction de la manutention en dollars ;
- I_v le budget d'investissement maximum pour la période v ;
- N le nombre total de périodes couvertes par l'horizon.

La fonction principale (équation 7) cherche à maximiser les bénéfices de configuration des zones moins leur coûts de configurations considérant des contraintes budgétaires par période (équation 8).

Une variante de cet algorithme serait de remplacer la contrainte d'investissement par une contrainte temporelle de capacité. Cette approche diminuerait les conséquences des arrêts de production dus à la configuration des cellules.

En fait, l'ampleur des répercussions attribuables à la configuration des cellules dynamiques est proportionnelle aux variables temps et argent. Si la réorganisation des zones est peu coûteuse et l'usine bénéficie d'une surcapacité de production, il n'y aura pratiquement aucune contrainte pour effectuer les configurations. Cependant, si l'une ou l'autre de ces variables devient critique, le 3^e module doit réduire au minimum les conséquences du réaménagement des cellules dynamiques.

2.2.4 Le module de contrôle du système

Le dernier module maintient le système aussi stable que possible en activant les modules appropriés seulement lorsque la situation dépasse certains seuils (Rheault,

Drolet et Abdalnour, 1995). Ces seuils doivent être préétablis afin de donner le niveau souhaité de sensibilité aux turbulences. Si le module de contrôle réagit trop hâtivement avec un horizon trop court, il y aura trop peu d'activités considérées pour justifier une reconfiguration physique des cellules. Par contre, s'il est trop lent à réagir, il réduira les performances globales des cellules dynamiques par un horizon trop grand.

En fait, ce module intervient de deux manières ; il détermine le moment où la configuration en cours devrait être reconsidérée et il définit quel sera le prochain horizon de configuration compte tenu des événements et des stratégies de reconfiguration. Il est possible de définir 3 stratégies pour la reconfiguration des cellules dynamiques, lesquelles ne sont pas nécessairement mutuellement exclusives.

2.2.4.1 Reconfiguration par période fixe ou saisonnière

Cette stratégie est simple, mais elle est également moins performante. Il s'agit d'activer systématiquement à une période fixe une reconfiguration des cellules à partir des données alors disponibles pour tout l'horizon de planification. Cette approche semblerait préférable lorsqu'il n'y a pas beaucoup de variation du mixte de produits à l'intérieur de l'horizon de planification. De plus, il est possible de combiner cette stratégie aux autres, forçant parfois une reconfiguration plus en profondeur à périodes fixes.

2.2.4.2 Reconfiguration par capacité requise

La stratégie basée sur la capacité requise permet une réévaluation lors d'une panne, d'un retard de production par rapport à la planification ou lors de l'arrivée de nouveaux produits. Elle s'intègre mieux avec la gestion des ressources manufacturières. Elle permet de modifier la configuration des cellules en fonction d'un accroissement de capacité grâce au temps supplémentaire et l'ajout temporaire d'un quart de travail, ou d'une baisse de capacité dû à de nouvelles demandes ou

d'une perte de disponibilité. Cette stratégie minimise la surcharge des postes de travail goulot en réorientant le flux de production.

Par contre, la gestion des seuils est plus difficile à cause du nombre de seuils nécessaires dont plusieurs risquent d'être fixés arbitrairement entraînant un certain biais. En effet, il peut être complexe de prédéfinir le niveau d'un seuil et souvent, c'est par l'expérimentation (essais et erreurs) que l'on pourra les établir.

Avec cette stratégie, la période de reconfiguration considère les produits selon leur ordre de priorité jusqu'à ce que la capacité de production désirée soit comblée. Donc selon la disponibilité des ressources, la configuration sera optimisée seulement pour les produits qu'il sera possible de faire, évitant ainsi de considérer des contraintes de produits ne pouvant pas être complétés à l'intérieur de l'horizon de planification des cellules.

2.2.4.3 Reconfiguration par le niveau de changement du mixte de produits

Les travaux de Seifoddini et Djassemi (1996) ont démontré l'effet du vieillissement des cellules lors d'une variation du mixte de produits. Or, leurs travaux renforcent la pertinence du concept des cellules dynamiques, car ils démontrent qu'il y a un seuil au-delà duquel il est préférable de changer plutôt que de maintenir un aménagement.

Ce seuil est calculé selon l'équation $P = 100 \frac{C}{n}$, où P est le pourcentage de changement ; C est le nombre de changements de produits et n est le nombre de produits inclus lors de la configuration cellulaire. Selon eux, lorsque le pourcentage de changement devient supérieur à 20 %, l'aménagement cellulaire initial n'est plus efficient. Cependant, il s'agit d'une variable décisionnelle qu'il faut déterminer en vertu des coûts de configuration et du niveau de variation du mixte de produits.

La détermination des seuils et des stratégies d'activation est un autre champ de recherches pour lequel il reste encore beaucoup à faire. Des recherches pourraient évaluer l'impact sur les performances d'un SMCD des facteurs suivants:

- l'arrivée de nouvelles commandes à l'intérieur de l'horizon de planification;
- la durée d'un arrêt de production ;
- les retards de production ;
- une panne d'équipement et,
- le taux d'utilisation des équipements .

3. L'expérimentation

3.1 Objectifs, hypothèses et limites

L'expérimentation a pour objectif de démontrer le principe de la reconfiguration des cellules à l'intérieur des zones et non d'évaluer la sensibilité ou les limites d'un système cellulaire dynamique. Le modèle a été conçu pour valider le module de configuration des cellules dynamiques, les autres modules devront faire l'objet d'une étude séparée.

3.1.1 Hypothèses expérimentales

L'expérimentation vise à confirmer trois hypothèses spécifiques. Premièrement, l'analyse des résultats devra valider l'hypothèse que l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques suggère toujours le meilleur aménagement économique possible pour un horizon donné compte tenu de la configuration actuelle. La démonstration consistera à comparer les coûts marginaux de manutention et de configuration entre la configuration proposée pour un horizon donné et la configuration de l'horizon précédent.

Deuxième hypothèse, l'algorithme du coût marginal donnerait de meilleurs résultats que la matrice pièces/machines de Burbidge. Pour valider ceci, chaque configuration élaborée avec l'algorithme du coût marginal sera comparée avec l'aménagement proposé par la matrice pièces/machines pour le même horizon de planification. Le détail des résultats de chaque configuration est présenté à l'annexe A.

Bien que le présent mémoire ne considère pas l'ensemble des modules d'un SMCD, l'appréciation du comportement de ce mode de production à partir de la simulation devrait tout de même permettre de confirmer une troisième hypothèse

sur la pertinence du concept cellulaire dynamique comme mode de production performant en contexte d'un environnement turbulent. Pour ce faire, la configuration initiale de l'usine sera considérée comme étant un aménagement en ateliers multigammes et les coûts de manutention marginaux seront comparés après chaque configuration avec cet aménagement.

3.1.2 Hypothèses relatives à la modélisation

La turbulence est simulée à partir d'une production sur mesure, c'est-à-dire qu'un produit/routage n'est pas répétitif d'un horizon de planification à l'autre. De plus, la demande fluctue selon une distribution triangulaire durant l'année, ce qui génère une forte période de pointe. Les routages sont attribués aléatoirement selon une distribution uniforme pour le nombre d'étapes ainsi que le numéro du poste de travail.

Compte tenu de l'absence d'un module d'ordonnancement, le niveau de complétion des produits en cours ne sera pas considéré lors de l'évaluation de la prochaine configuration. Ainsi, lors d'une reconfiguration, les produits non complétés ne seront pas considérés dans le nouvel horizon de planification.

Comme le module de contrôle n'existe que sous une forme embryonnaire, nous considérerons que lorsqu'un horizon est fixé, planifié et configuré, il n'y aura pas d'impondérable susceptible d'entraîner une reconfiguration hâtive. L'horizon de planification minimum sera d'un mois pour maintenir une certaine stabilité.

Afin de démontrer le concept de la mobilité des équipements, la plupart des postes de travail seront considérés facilement relocalisables moyennant une base de coûts fixes et un coût variable proportionnel à la distance de déplacement. Les coûts moyens de configuration d'un poste de travail sont inférieurs aux coûts moyens de manutention interzones des lots, soit en moyenne 28\$ pour déplacer un poste contre 57\$ pour manutentionner une commande (nombre moyen de lots de transfert = 20 lots/commande). Il peut paraître invraisemblable d'avoir des coûts de configuration si faibles. Cependant, une fois les postes de travail adaptés de manière à les déplacer

facilement (utilisation de connections rapides, de roulettes, de harnais de transport, etc.), leurs coûts de configuration diminuent grandement. Les coûts de configuration des postes seront fixés arbitrairement.

Les coûts de manutention des lots par unité de longueur sont les mêmes peu importe l'étape ou le produit. La valeur par unité de longueur a été estimée à partir de connaissances empiriques à 0,07\$/pied. Il est très difficile d'établir une valeur réaliste dans une démonstration abstraite. Il a donc fallu recourir à une valeur représentative de la réalité. Or, l'auteur se réfère aux entreprises où il a travaillé pour corroborer et confirmer cette valeur (la valeur correspond aux coûts de manutention de la compagnie GRS international inc., sous-traitant de pièces de métal en feuille).

3.1.3 Limites relatives à l'expérimentation

L'analyse des résultats permettra d'évaluer les coûts de manutention pour chaque configuration cellulaire. Les autres critères de performance ne peuvent être quantifiés qu'avec l'activation de l'ensemble des modules qui composent un SMCD.

Une des principales limites est l'absence du module d'attribution et de cheminement qui permettrait une optimisation des familles dynamiques et l'exploitation de proximités existantes. Puisque ce module n'est pas couvert par ce mémoire, il n'y aura donc pas de routage alternatif, ni de postes de travail identiques dans la simulation. Cependant, ceci augmente la turbulence de la simulation.

La taille du modèle est restreinte compte tenu des limites technologiques actuelles. Ainsi, le nombre maximum d'échanges (E_{pkl}) par horizon de planification ne peut dépasser une trentaine d'échanges. De plus, les flux provenant de la réception et allant vers l'expédition n'ont pas été inclus dans l'analyse des solutions, ce qui enlève l'optimisation en fonction de la position relative de l'expédition et de la réception. Il aurait été trop lourd d'inclure ces flux puisque tous les produits auraient eu des échanges supplémentaires avec la réception et l'expédition.

3.1.4 Outils et concepts utilisés pour la simulation

L'expérimentation s'est déroulée sur un ordinateur Pentium 166 MHz, avec 32 Mo de RAM. Des expérimentations antérieures (Rheault, Drolet et AbdulNour, 1996(2)) avait été effectuées sur un 486 DX 33 MHz et 32 Mo de RAM. L'évolution de la technologie a permis de diminuer de moitié la durée de résolution d'un problème d'envergure similaire.

Le délai pour la résolution d'une configuration ayant 5 zones, 16 postes de travail et 28 échanges distincts sera d'environ 6 heures, alors que pour un nombre d'échanges distincts égalant 18, il sera inférieur à 15 minutes. Cependant, avec l'évolution effrénée de la technologie des ordinateurs, il est plus que réaliste de s'attendre à pouvoir résoudre des problèmes plus larges et empiriques d'ici deux ou trois ans.

3.1.4.1 Génération des données

Tous les nombres aléatoires utilisés pour l'expérimentation de ce mémoire ont été générés à partir du simulateur « Arena 1.0 » (version évoluée de Syman V). Pour reproduire un calendrier d'arrivées de commande, 4 séries de nombres pseudo-aléatoires étaient requises :

1. La date d'arrivée en production est distribuée triangulairement de 0 à 10080 heures avec une pointe à 5400 heures. Le choix de cet étendu permet de créer une pointe variant d'une année à l'autre. 10080 heures ouvrables correspondent à 18 mois de 560 heures (1 an ayant environ 280 jours ouvrables, 1 mois aura 23.33 jours ouvrables de 24 heures). L'effet de la distribution triangulaire donnera une faible demande pour les 6 premiers mois, alors que le 9^e et 10^e mois seront les périodes de pointe.
2. Le nombre d'opérations est réparti selon une distribution discrète et uniforme variant de 2 à 4.

3. Le numéro de poste de travail pour chacune des étapes est attribué selon une loi uniforme discrète de 1 à 16. La répartition uniforme élimine l'existence de goulot chronique. Par contre, l'effet aléatoire pris ponctuellement contribue à l'apparition de goulots temporaires différents d'un horizon de planification à l'autre. Du même coup, il arrivera qu'un poste ayant été fortement sollicité durant une période se verra pratiquement inutilisé à une autre période.
4. Le nombre de lots de transfert entre deux étapes successives est uniformément répartie entre 1 et 39. Le fait que le nombre de lots de transfert varie uniformément accentue l'effet de turbulence. Pour un produit donné, le nombre de lots de transfert sera constant entre les étapes de son cheminement.

3.1.4.2 Codification et résolution du modèle

Les données concernant les postes de travail, les zones, les coûts de configuration, les distances interzones et les horizons de planification sont administrées par un gestionnaire de base de données relationnelles Visual FoxPro 3.0. La base de données génère un fichier texte contenant la codification du modèle du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques pour chaque itération. Les données concernant la nouvelle configuration doivent être réintroduites manuellement dans la base de données une fois le modèle solutionné avant de pouvoir effectuer l'itération suivante. Un exemple de fichier texte contenant la formulation de l'algorithme se trouve à l'annexe B.

La solution est obtenue à l'aide du logiciel de résolution de programmation linéaire, en nombres entiers et quadratiques Lindo 5.0, version industrielle. Malgré la puissance de cet outil, il s'est avéré trop limité pour la résolution de modèles quadratiques d'envergures. Ainsi, une conversion de la programmation quadratique en programmation mixte linéaire/nombres entiers a donc été nécessaire afin de pouvoir expérimenter le concept cellulaire dynamique (voir la section 2.2.2). Les résultats des solutions sont enregistrés dans des fichiers textes avec l'extension

« .OUT ». De plus, afin d'optimiser le temps de traitement d'une itération, une utilisation judicieuse des options d'optimisation de Lindo telles que TITAN (resserre les limites des contraintes et des coefficients), IPTOL et BIP s'est avérée essentielle. IPTOL a été fixé à 5 % (Lindo ne retiendra que les branches dont les solutions obtiennent un gain de plus de 5%) et BIP limite les solutions acceptables à un maximum de 1200\$ (cette valeur a été identifiée par des itérations antérieures).

3.1.5 Données initiales

Afin de faciliter la visualisation de l'usine, supposons que l'usine s'apparente à une usine de transformation de métal en feuille. L'aménagement en ateliers multigammes se divise en 5 départements (voir Figure 4) :

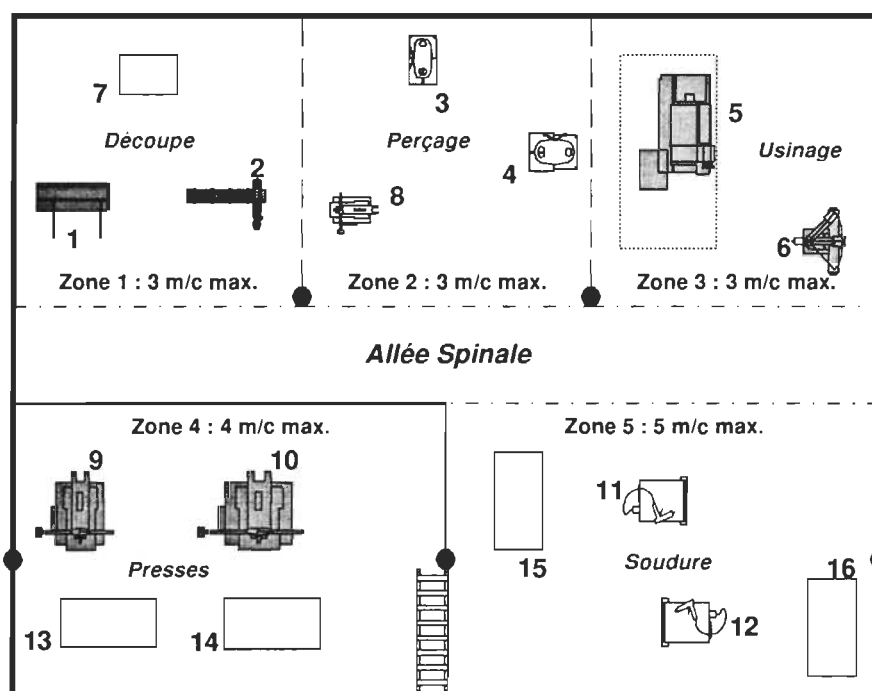


Figure 4 : Aménagement initial en ateliers multigammes

1. la découpe d'une superficie de 20'X20' peut contenir 3 postes de travail standards ;
2. le perçage d'une superficie de 20'X20' peut contenir 3 postes de travail standards ;

3. l'usinage d'une superficie de 20'X20' peut contenir 3 postes de travail standards ;
4. le département des presses d'une superficie de 30'X20' peut contenir 4 postes de travail standards et ;
5. la soudure d'une superficie de 30'X20' peut contenir 5 postes de travail standards.²

Pour conserver une cohérence dans l'analyse des résultats, la disposition des zones correspond à celle des départements de l'aménagement en ateliers multigammes. Bien que les zone 4 et 5 sont de même superficie, elles n'ont pas la même capacité afin de mieux analyser les comportements du modèle.

Le poste de travail numéro 5 prend l'espace de deux postes de travail standards. Tous les autres postes occupent relativement une même superficie. Pour le poste de travail numéro 1, il a été déterminé qu'il ne devait pas quitter la zone 1, donc une charge fixe excessive de 300\$ est imputée pour déplacer ce poste dans les autres zones. Le Tableau 1 présente les coûts fixes de configuration pour chaque poste. Tandis que le Tableau 2 montre la matrice des coûts variables proportionnels aux déplacements interzones. Le Tableau 3 présente la matrice des distances rectilinéaires d'un centroïde d'une zone à l'autre en passant par l'allée spinale. Ces distances sont employées pour l'évaluation des coûts de manutention interzone. Ces matrices sont symétriques pour simplifier la modélisation, mais elles auraient pu aussi bien être asymétriques. À l'annexe C, on présente le calendrier du carnet de commandes pour les 18 mois de la simulation. On y retrouve pour chaque produit la gamme opératoire, le nombre de lots de transfert (E_{pkl}), le coût de manutention par pied linéaire, ainsi que l'heure d'arrivée dans la simulation. Toutes ces données ont été générées selon la méthodologie de la section 3.1.4.1.

² La capacité des zones 4 et 5 ne sont pas identiques pour mieux démontrer les propriétés du modèle.

Tableau 1 : Coûts fixes par poste de travail

Poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Coûts fixes (\$)	300	10	15	20	25	30	35	40	45	50	5	10	15	20	25	30

**Tableau 2: Coûts variables (\$)
d'une zone à l'autre**

	1	2	3	4	5
1	0	5	7	3	6
2	5	0	5	4	4
3	7	5	0	6	3
4	3	4	6	0	6
5	6	4	3	6	0

**Tableau 3: Distance en unité
de longueur d'une zone à l'autre**

	1	2	3	4	5
1	0	50	70	35	65
2	50	0	50	45	45
3	70	50	0	65	35
4	35	45	65	0	60
5	65	45	35	60	0

3.2 Analyse des résultats de la simulation

3.2.1 Analyse détaillée des comportements de l'algorithme

Il y a plusieurs comportements intéressants ressortant de l'analyse des résultats. Le Tableau 4 présente un résumé des 9 configurations sur lesquelles découlera l'analyse de l'expérimentation. Ainsi, on y retrouve pour chaque configuration l'emplacement des postes de travail selon le numéro de la zone. la configuration initiale est la configuration 0. À l'annexe A, les plans des configurations sont présentés avec le tableau des PFA pour chaque horizon.

**Tableau 4 : Localisation des postes
dans les zones après chaque configuration**

Poste	Zone par n° de Configuration									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	4	5	4	5	5	5	3
3	2	4	4	5	5	1	1	5	5	1
4	2	5	5	5	5	3	4	4	4	5
5	3	3	4	4	4	5	3	3	2	2
6	3	2	2	2	2	2	4	5	5	5
7	1	1	1	5	5	5	1	3	3	3
8	2	5	5	1	1	5	5	5	5	5
9	4	5	3	1	1	1	4	4	4	5
10	4	4	5	3	3	4	4	4	4	4
11	5	2	4	2	2	2	5	2	1	1
12	5	4	5	5	2	5	5	1	4	4
13	4	4	3	5	3	3	2	5	5	5
14	4	5	5	2	5	4	5	1	1	4
15	5	3	3	3	3	3	3	2	3	2
16	5	5	1	4	4	4	2	2	2	4

3.2.1.1 optimisation des flux les plus coûteux

L'algorithme optimise les flux de production en favorisant les échanges les plus importants au détriment des autres. La Figure 5 et Figure 6 présentent le diagramme des flux de production avant et après la reconfiguration cellulaire dynamique pour le premier horizon de planification. La largeur des flèches est proportionnelle au nombre d'échanges entre deux postes (voir Tableau 5). Ainsi, lorsque l'on compare les flux de production du premier horizon de planification pour 4 mois entre l'aménagement en ateliers multigammes et l'aménagement cellulaire dynamique, l'amélioration du flux est nettement observable. Les flux de l'aménagement en ateliers multigammes sont représentatifs de ce mode de production tandis que l'on peut constater que le modèle cellulaire dynamique a concentré les échanges les plus volumineux à proximité et il a éloigné ceux qui le sont moins. Il en est arrivé à définir une meilleure configuration tout en respectant la capacité maximale des zones.

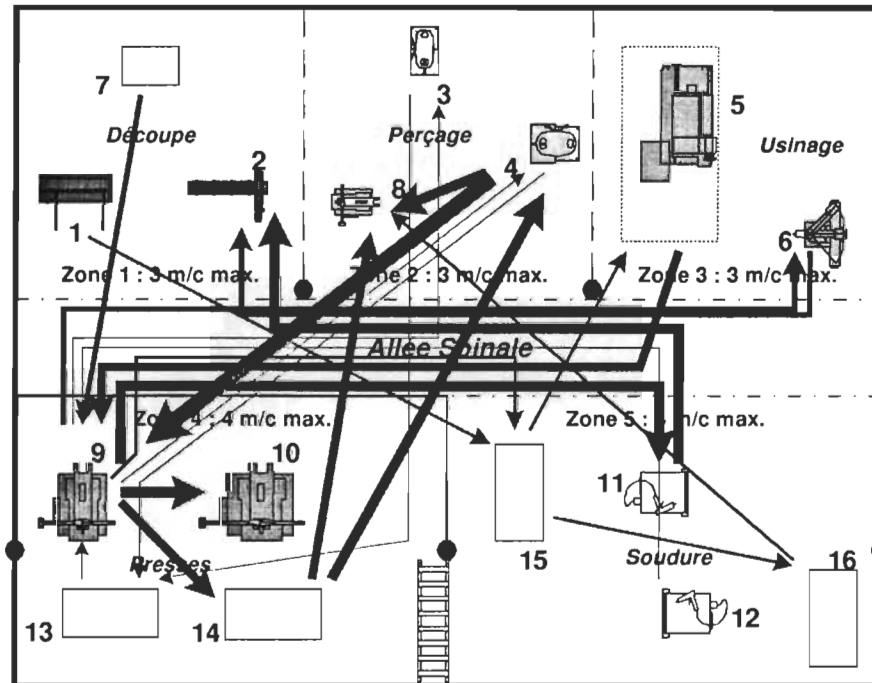


Figure 5 : Diagramme des flux de production en ateliers multigammes

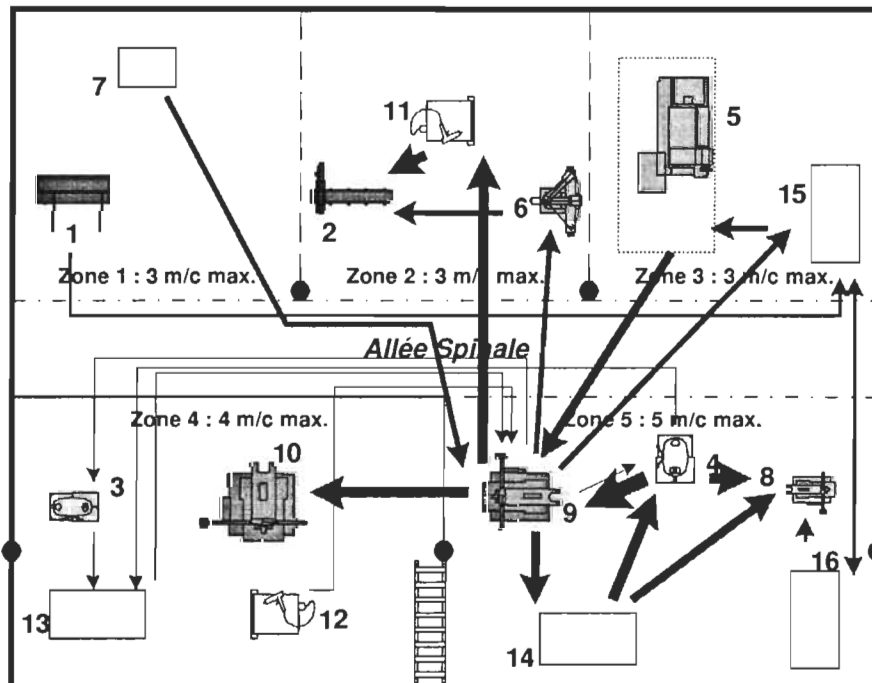


Figure 6 : Diagramme des flux de production en cellules dynamiques

3.2.1.2 Centralisation des goulots

Cette première itération fait également ressortir un deuxième comportement du modèle mathématique. Il centralise les postes goulots. En effet, à l'intérieur de l'horizon de planification, le poste 9 est devenu un goulot ponctuel très achalandé. Dans sa position initiale, ce poste était à une extrémité de l'usine, l'aménagement cellulaire dynamique proposé déplace le poste 9 dans la zone ayant le plus de capacité avec les autres postes avec lesquels il a des échanges importants. Même si l'algorithme ne dispose pas les postes à l'intérieur des zones, le positionnement du poste 9 dans la zone était trivial, compte tenu que le poste 16 n'était pas déplacé, il n'y avait que 4 positions possibles. Ce comportement peut aussi s'observer dans la 4^e itération (voir Tableau 9 et Figure 8) avec le poste 4.

3.2.1.3 Configuration dépendante de la séquence des opérations des produits

L'algorithme du coût marginal minimal considère la séquence des opérations dans l'évaluation de solutions. Ainsi, comme on peut le déduire du Tableau 5, l'échange le plus important est le couple composé des postes 4 et 9 ($6+21+35 = 62$ transferts) tandis que le produit 2 (la séquence étant 9 - 11 - 2) est le produit ayant le plus de lots de transfert (36). Par conséquent, il a favorisé la proximité des postes 4 et 9 dans la zone 5 et a regroupé les postes 2 et 11 dans la zone 2 afin de minimiser la manutention interzone. Les postes 2 et 11 sont les moins coûteux à déplacer et la zone 2 était disponible compte tenu des autres mouvements. Si nous avions utilisé la PFA (voir Tableau 6), il n'y aurait eu aucune distinction par la séquence d'opérations et, par conséquent, nous aurions été confrontés à l'incapacité de regrouper économiquement les trois postes dans une même zone. En fait, la PFA aurait entraîné la conclusion qu'il n'y a pas de cellule distincte et qu'il serait préférable de maintenir l'aménagement en ateliers multigammes.

Or, l'algorithme du coût marginal minimal a proposé un aménagement hybride respectant les fondements des cellules virtuelles (voir la section 1.3.6). La solution a

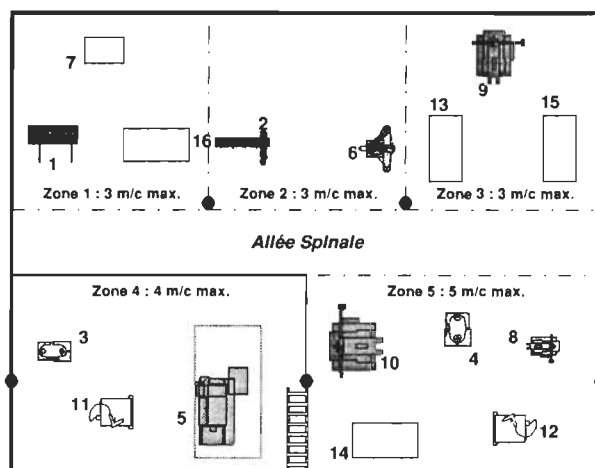
3.2.1.4 Relocalisation de postes inutilisés pour récupérer l'espace d'une zone

Lors de la deuxième itération, un autre comportement particulier de l'algorithme du coût marginal minimal consiste à déplacer un poste dans le seul but de libérer la zone, même si ce poste n'est pas utilisé dans l'horizon de planification. En effet, le poste 9 a été déplacé de la zone 5 à la zone 3 afin de libérer la zone 5 ayant le plus de capacité et ainsi, y concentrer le plus d'activités. La zone 3 est pratiquement inutilisée avec seulement le poste 13 d'actif et au plus 6 transferts interzones. Ce comportement est aussi observable aux configurations 4 et 9. À la 4^e configuration, les zones 3 et 4 sont totalement inutilisées ainsi qu'à la 9^e configuration où la zone 3 est, là aussi, inutilisée. Le fait que la zone 3 soit la première zone à être inutilisée s'explique par le fait qu'elle est la plus distante en moyenne des autres zones (voir Tableau 3) et qu'il n'y a aucune contrainte forçant le maintien d'un poste dans cette zone, comme dans le cas du poste 1 dans la zone 1.

De plus, si l'on observe la PFA du 2^e horizon de planification présentée au Tableau 7, on note le regroupement d'une cellule exclusive composée des postes 3, 5 et 11 pour la famille dynamique contenant les produits 3, 14 et 25. Nous retrouvons la même cellule dans la zone 4 constituée par l'algorithme de configuration des cellules dynamiques (voir la Figure 7 : 2^e configuration cellulaire dynamique).

**Tableau 7 : PFA de Burbidge pour le
2^e horizon**

		Produits								
		73	38	41	1	71	67	3	14	25
P o s t e s	8	1	1	1						
	12	1			1					
	1	1								
	16	1								
	2		1				1			
	6		1				1			
	10		1					1		
	4			1				1		
	7			1						
	13			1						
	14				1	1	1			
	5							1	1	1
	3							1		
	11								1	1
	9									
15										



**Figure 7 : 2e configuration cellulaire
dynamique**

3.2.1.5 Optimisation des proximités postes/zones

Lorsque l'on observe l'ensemble des itérations, on constate que la zone 5 a été réaménagée à chacune d'entre elles. Il en est ainsi puisque cette zone a la plus grande capacité, ce qui permet d'avoir plus de flux intrazones et ainsi réduire les manutentions interzones. Mais la capacité de la zone 5 étant limitée, l'algorithme a exploité la proximité des zones voisines afin de réduire les distances des flux interzones inévitables. Dans la simulation servant à l'expérimentation, il n'y avait qu'une seule superficie supplémentaire disponible équivalente à la taille d'un poste standard pour l'ensemble de l'usine, ce qui n'a pas permis au module de configuration cellulaire dynamique de concentrer davantage les activités dans un minimum de superficie. Cependant, si le nombre de postes avait été moindre laissant

plus de place, nous aurions constaté que des zones entières auraient été inoccupées de la même manière qu'il a regroupé des postes inutilisés dans une même zone.

3.2.1.6 Optimisation de l'aménagement en comparaison de l'aménagement précédent.

Le Tableau 8 présente pour chaque horizon, la comparaison entre les coûts marginaux de manutention et de configuration de la solution proposée et les coûts marginaux de manutention de la configuration précédente maintenue pour le nouvel horizon. On peut constater que l'algorithme du coût marginal a réduit significativement les coûts marginaux de manutention par rapport à l'aménagement de l'horizon précédent. Les économies faites pour les 17 mois planifiés dépassent les 41% et la moyenne de ces économies par itération est de $40.93\% \pm 16.59\%$. Compte tenu de nos conditions expérimentales, l'environnement turbulent a accentué le vieillissement des cellules dynamiques. L'expérimentation corrobore l'importance de reconfigurer les cellules dès que la vie utile d'un aménagement est dépassée. De plus, bien que la configuration précédente demeure une solution envisageable, l'algorithme du coût minimal marginal a proposé à chaque itération une meilleure alternative permettant d'optimiser davantage les flux de production.

Tableau 8 : Comparaison des coûts marginaux entre la configuration proposée et précédente

Itération	Taille de l'horizon (mois de 560 h.)	Coûts marginaux en \$		Réduction des coûts %
		Configuration proposée	Configuration précédente	
1	4	1023.70	1443.40	29.08
2	2	478.10	1075.90	55.56
3	2	969.00	2118.90	54.27
4	1	236.50	646.45	63.42
5	1	1125.50	1814.75	37.42
6	1	797.00	971.95	18.00
7	1	612.70	1146.60	46.56
8	1	735.05	886.55	17.09
9	4	655.80	1223.25	46.39
Total	17	6633.35	11327.75	41.44
Moyenne	-	737.04	1258.64	40.93
Écart type	-	280.65	464.50	16.59

3.2.1.7 Exemple de calculs :

Voici un exemple de calculs pour comparer les coûts marginaux entre la nouvelle configuration et la configuration précédente (entre la 3e et 4e configuration).

Fonction objective pour la 4^e itération :

MIN $0 X_{1a1} + 30000 X_{1a2} + 30000 X_{1a3} + 30000 X_{1a4} + 30000 X_{1a5} + 1300 X_{2a1} + 1400 X_{2a2} + 1600 X_{2a3} + 0 X_{2a4} + 1600 X_{2a5} + 2100 X_{3a1} + 1900 X_{3a2} + 1800 X_{3a3} + 2100 X_{3a4} + 0 X_{3a5} + 2600 X_{4a1} + 2400 X_{4a2} + 2300 X_{4a3} + 2600 X_{4a4} + 0 X_{4a5} + 2800 X_{5a1} + 2900 X_{5a2} + 3100 X_{5a3} + 0 X_{5a4} + 3100 X_{5a5} + 3500 X_{6a1} + 0 X_{6a2} + 3500 X_{6a3} + 3400 X_{6a4} + 3400 X_{6a5} + 4100 X_{7a1} + 3900 X_{7a2} + 3800 X_{7a3} + 4100 X_{7a4} + 0 X_{7a5} + 0 X_{8a1} + 4500 X_{8a2} + 4700 X_{8a3} + 4300 X_{8a4} + 4600 X_{8a5} + 0 X_{9a1} + 5000 X_{9a2} + 5200 X_{9a3} + 4800 X_{9a4} + 5100 X_{9a5} + 5700 X_{10a1} + 5500 X_{10a2} + 0 X_{10a3} + 5600 X_{10a4} + 5300 X_{10a5} + 1000 X_{11a1} + 0 X_{11a2} + 1000 X_{11a3} + 900 X_{11a4} + 900 X_{11a5} + 1600 X_{12a1} + 1400 X_{12a2} + 1300 X_{12a3} + 1600 X_{12a4} + 0 X_{12a5} + 2100 X_{13a1} +$

$$\begin{aligned}
& 1900 X_{13a2} + 1800 X_{13a3} + 2100 X_{13a4} + 0 X_{13a5} + 2500 X_{14a1} + \\
& 0 X_{14a2} + 2500 X_{14a3} + 2400 X_{14a4} + 2400 X_{14a5} + 3200 X_{15a1} + \\
& 3000 X_{15a2} + 0 X_{15a3} + 3100 X_{15a4} + 2800 X_{15a5} + 3300 X_{16a1} + \\
& 3400 X_{16a2} + 3600 X_{16a3} + 0 X_{16a4} + 3600 X_{16a5} + 91 D_{1a3} + 231 D_{2a4} + \\
& 231 D_{2a14} + 91 D_{3a4} + 231 D_{4a2} + 70 D_{4a8} + 133 D_{4a11} + 91 D_{4a14} + \\
& 133 D_{11a12}
\end{aligned}$$

Position des postes de travail à la 3^e configuration :

Poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zone	1	4	5	5	4	2	5	1	1	3	2	5	5	2	3	4

Distance entre les échanges (E_{pkl}) du 4^e horizon en maintenant la 3^e configuration :

E_{pkl}	D1a3	D2a4	D2a14	D3a4	D4a2	D4a8	D4a11	D4a14	D11a12
distance	65	60	45	0	60	65	45	45	45

Calculs des coûts marginaux pour le 4^e horizon en maintenant la 3^e configuration :

$$\begin{aligned}
\text{Coûts marginaux} &= 91 (65) + 231 (60) + 231 (45) + 91 (0) + 231 (60) + 70 (65) + \\
& 133 (45) + 91 (45) + 133 (45) \\
&= 64645 \text{ ¢} = 646.45 \$
\end{aligned}$$

Position des postes de travail à la 4^e configuration :

Poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zone ³	1	5	5	5	4	2	5	1	1	3	2	2	3	5	3	4

Distance entre les échanges (E_{pkl}) du 4^e horizon avec la 4^e configuration :

³ Les cellules en gris indiquent les postes ayant été déplacés.

E_{pkl}	D1a3	D2a4	D2a14	D3a4	D4a2	D4a8	D4a11	D4a14	D11a12
distance	65	0	0	0	0	65	45	0	0

Calculs des coûts marginaux pour le 4^e horizon avec la 4^e configuration :

$$\begin{aligned}
 \text{Coûts marginaux} &= 1600 (1) + 1400 (1) + 1800 (1) + 2400 (1) + 91 (65) + 231 (0) + \\
 &231 (0) + \\
 &\quad 91 (0) + 231 (0) + 70 (65) + 133 (45) + 91 (0) + 133 (0) \\
 &= 23650 \text{ €} \quad = 236.50 \$
 \end{aligned}$$

3.2.2 Analyse de la comparaison de l'algorithme du coût marginal minimal avec la PFA de Burbidge

Afin de s'assurer que l'algorithme du coût marginal minimal fournit une bonne alternative pour chaque horizon de planification, la PFA de Burbidge a été utilisée comme base de comparaison. Cependant, malgré la simplicité et l'efficacité reconnues de la PFA, cette dernière n'a pas fourni une seule configuration présentant de réels regroupements cellulaires. Tout au plus, il n'y a eu qu'un horizon pour laquelle une cellule pouvait être distinguée. En fait, il était prévisible que la PFA fournirait une faible performance puisque nous avons une distribution uniforme en ce qui a trait à la probabilité qu'un poste soit attribué à un produit. Il n'y avait donc aucune répétition quelconque d'un routage autre que le fruit du hasard. Or, la PFA ne permet de distinguer des cellules que lorsqu'il y a des similarités entre certains produits.

Lorsque l'on étudie attentivement la 4^e itération, il y a apparition d'un goulot temporaire avec le poste 4. La PFA présentée au Tableau 9 traite la situation comme s'il n'y avait aucun regroupement possible compte tenu de l'utilisation du poste 4 à tous les produits de cet horizon. Cependant, si l'on fait abstraction du poste 4, nous voyons apparaître trois sous-groupes distincts. Un sous-groupe comprenant uniquement le poste 8, l'autre comprenant les postes 1, 2, 3 et 14, et le dernier sous-groupe est composé des postes 11 et 12. Or, nous retrouvons exactement la configuration de ces sous-groupes dans la configuration proposée par l'algorithme du

coût marginal minimal (voir Figure 8) à l'exception du poste 1 qui économiquement ne pouvait être déplacé. De plus, l'algorithme a déterminé la zone qui bénéficierait le plus de la présence du poste 4 et ce fut la zone 5. Le fait que le poste 8 n'ait pas été déplacé dans la zone 5 à la place du poste 7 s'explique par le coût trop élevé de déplacement des deux postes comparativement aux coûts de manutention pour le produit 4 entre les zones 1 et 5.

Tableau 9 : PFA de Burbidge du 4e

		Produits			
		4	29	68	50
P o s t e s	4	1	1	1	1
	8	1			
	14		1	1	
	1		1		
	3		1		
	2			1	
	11				1
	12				1
	5				
	6				
	7				
	9				
	10				
	13				
	15				
	16				

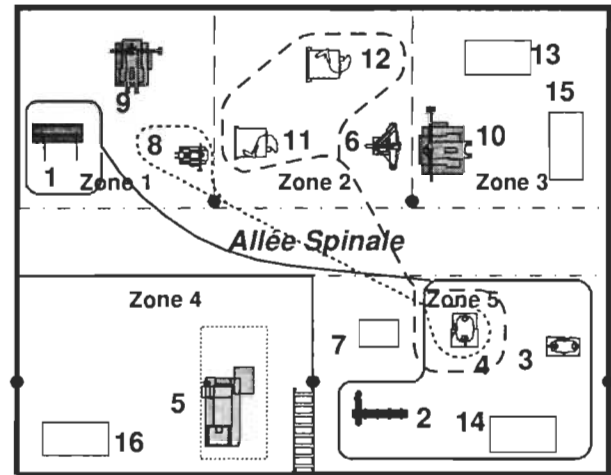


Figure 8 : Configuration pour le 4e

horizon

En fait, l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques ne se contente pas de déterminer le meilleur regroupement cellulaire, il définit le meilleur aménagement d'usine, qu'il soit en ateliers multigammes, cellulaire, en ligne ou une combinaison hybride. La volonté de considérer les contraintes physiques et économiques est arbitraire. Ainsi, en considérant que les

coûts de configuration des postes seraient négligeables, l'algorithme ne respecterait que les contraintes physiques telles que l'incompatibilité d'un poste dans une zone ou la capacité maximum de chaque zone. Ainsi, la configuration proposée ne minimiserait que le flux de production indépendamment de la position initiale des postes de travail.

Par contre, la PFA ne peut arriver à une telle optimisation puisqu'elle ne considère pas la séquence de production des produits. Elle confond l'ensemble des postes pour un produit comme s'ils devaient nécessairement être réunis physiquement ensemble et ce, même s'il n'y a aucun échange entre le premier poste de la séquence et le dernier. De plus, la PFA ne considère aucune contrainte physique, ce qui peut rendre laborieux l'exercice de transposer la solution de la PFA en une solution réalisable. En fait, la PFA permet surtout une évaluation d'un premier aménagement plutôt qu'un réaménagement à partir d'une disposition initiale des installations industrielles. Tandis qu'avec l'algorithme du coût marginal minimal, non seulement fournit-il une solution réalisable, mais il est particulièrement efficace pour les réaménagements à partir d'une disposition initiale des installations industrielles.

La PFA n'est donc pas l'outil de toutes les circonstances pour l'évaluation d'un aménagement cellulaire. Il n'est pas rare que les solutions de la PFA ne permettent pas de définir des cellules mutuellement exclusives physiquement réalisables, particulièrement dans un environnement turbulent comme le démontre l'expérimentation. Or, l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques fournit toujours une solution réalisable. Parfois cette solution peut consister au maintien de la configuration actuelle, ne justifiant le déplacement d'aucun poste. Mais, dans ce dernier cas, il peut aussi s'agir d'un horizon trop court ou d'un environnement peu turbulent. Dans le contexte d'un système manufacturier cellulaire dynamique, l'emploi de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques s'avère tout indiqué, surtout en environnement

turbulent, puisqu'un tel système ne peut fonctionner sans la certitude de toujours avoir une solution réalisable à chacune de ses itérations.

3.2.3 Analyse du comportement du concept des cellules dynamiques

Le concept cellulaire dynamique est une succession dynamique d'itérations optimisant la répartition des postes de travail dans des zones. Les véritables avantages de ce concept doivent être mesurés sur l'ensemble des itérations plutôt que sur la performance individuelle de chacune d'entre elles. Surtout lorsque l'on veut comparer ce concept avec un autre mode de production. Le Tableau 10 présente un résumé des performances individuelles de chaque itération ainsi que les performances globales de l'ensemble des itérations. Ce tableau présente les coûts marginaux totaux de manutention et de configuration sur une période de 17 mois⁽⁴⁾ par itération, ainsi que les coûts moyens et les écarts types pour les deux modes de production comparés. Compte tenu des conditions expérimentales, ce tableau nous permet de conclure qu'en adoptant un mode de production cellulaire dynamique, les coûts des manutentions interzones ont été considérablement réduits (38%). Cette réduction a été obtenue malgré les coûts supplémentaires de déplacement des postes de travail. De plus, les résultats du Tableau 10 démontrent que le principe dynamique des SMCD permet de maintenir une réduction moyenne des coûts par horizon comparativement aux ateliers multigammes empêchant ainsi une dégénérescence des performances. Il peut arriver qu'une itération prise isolément propose une configuration moins performante qu'un aménagement en ateliers multigammes comme dans le cas de la configuration de 6^e itération. Il n'en demeure pas moins que la 6^e configuration répondait plus efficacement aux besoins de son horizon qu'avec le maintien de la 5^e configuration pour ce même horizon. En effet, chaque configuration

⁴ Bien que l'étendu de la distribution triangulaire des dates d'arrivée des commandes était sur 18 mois, il n'y a eu aucune commande générée par le simulateur au-delà du 17^e mois.

proposée par le module de configuration des cellules dynamiques dépend de la configuration précédente. Par conséquent, contrairement à la plupart des méthodes d'élaboration d'aménagement, le concept des cellules dynamiques considère l'état présent du système et cherche à l'améliorer plutôt que d'établir la meilleure configuration d'usine peu importe les contraintes physiques ou économiques. C'est ainsi que les SMCD s'adaptent aux impondérables d'un environnement turbulent.

Tableau 10 : Comparaison des coûts marginaux de manutention et de configuration

Itération	Taille de l'horizon (mois de 560 h.)	Coûts marginaux en \$		Réduction des coûts %
		Configuration proposée	Configuration précédente	
1	4	1023.70	1443.40	29.08
2	2	478.10	1035.65	53.84
3	2	969.00	1780.10	45.56
4	1	236.50	458.15	48.38
5	1	1125.50	1592.85	29.34
6	1	797.00	771.75	-3.27
7	1	612.70	1213.10	49.49
8	1	735.05	1031.45	28.74
9	4	655.80	1368.85	52.09
Total	17	6633.35	10695.30	37.98
Moyenne	-	737.04	1188.37	37.03
Écart type	-	280.65	413.33	18.31

3.2.3.1 Le cycle de vie des configurations

Comme il a été dit précédemment, chaque configuration a permis de maintenir en moyenne une réduction des coûts marginaux de 37.03% \pm 18.31% par rapport à un aménagement multigamme. Cela démontre bien la signification du 3^e axe présenté à la Figure 2. En ayant réduit les horizons de planification entre 1 et 4 mois, nous avons optimisé l'aménagement pour chacun de ces horizons. Chaque fois que les cellules atteignaient la fin de leur vie utile, une nouvelle configuration était

générée. Ainsi, les postes qui se trouvaient rassemblés dans une même zone bénéficiaient de tous les avantages des technologies de groupes sans subir les conséquences d'un vieillissement typique des cellules des systèmes statiques en environnement turbulent. L'expérimentation tend à démontrer qu'en réduisant le cycle de vie d'un aménagement, il est possible d'adopter un mode de production plus efficient que les ateliers multigammes et, du même coup, d'être plus compétitif en contexte d'un environnement turbulent.

4. Conclusion

C'est par une meilleure compréhension de l'impact d'un environnement turbulent sur les industries que ce mémoire a été orienté vers la recherche d'un mode de production répondant mieux à un tel environnement. Ce mémoire introduit le concept des cellules dynamiques s'adaptant à la fois aux contraintes d'un environnement turbulent et aux contraintes physiques des installations industrielles. Ce concept se veut une évolution des cellules classiques et virtuelles.

Bien des systèmes manufacturiers ont été développés, mais tous considèrent l'aménagement d'une usine comme fixe et plus ou moins invariable, à l'image de la définition de Chen et Chung (1991) présentée à la section 1.2. À l'opposé, le concept des cellules dynamiques se fonde sur l'affirmation que les postes de travail ou les machines peuvent être relocalisés lorsqu'il est économiquement justifiable de le faire. Exploitant ce nouveau paradigme, ce concept s'articule à l'intérieur d'un Système Manufacturier Cellulaire Dynamique (SMCD).

Jusqu'à présent, pour choisir un mode de production, il existait une relation se basant exclusivement sur le volume des productions et sur la variété des produits. Or, selon cette relation, la plupart des entreprises exposées à un environnement turbulent devaient maintenir un aménagement en ateliers multigammes très flexible mais peu productif et peu compétitif. Cependant, un nouvel axe a été proposé qui met en perspective la relation de productivité et de flexibilité avec le ratio du cycle de vie moyen des produits sur l'horizon de l'aménagement. Ainsi, il devient possible d'adopter un mode cellulaire, plus avantageux, simplement en réduisant la vie utile de l'aménagement, plus près du cycle de vie des produits. Du même coup, en réduisant l'horizon de planification de l'aménagement, on réduit la variété des produits à

considérer, ce qui diminue la complexité d'établir un nouvel aménagement. C'est le principe dynamique d'un SMCD.

Pour apprécier le concept des cellules dynamiques, il faut réaliser toute la portée de la mobilité des postes de travail. La mobilité d'un poste de travail dépend des coûts engendrés par son déplacement en comparaison des coûts de manutention des produits relatifs au maintien de sa position actuelle. Or, rendre plus facile à déplacer un équipement permet d'accroître sa flexibilité. Plus les postes de travail seront faciles à relocaliser, plus l'entreprise pourra minimiser ses coûts de manutention. Toutefois, certains postes ne seront jamais relocalisés, forçant les autres postes à se positionner selon l'importance de leurs échanges avec ces postes. De même, un poste fortement sollicité tel un goulot aura tendance à être au cœur de l'action.

Le modèle de SMCD se schématise par une boucle fermée composée de 4 modules. Ces modules sont d'une importance majeure dans la performance de ce mode de production. Le premier module détermine l'affectation des postes aux produits ainsi que leur cheminement, faisant un compromis entre le taux d'utilisation des postes et leur proximité. Il définit les familles dynamiques pour l'horizon de planification. Le second module est le cœur des SMCD. C'est le module de configuration des cellules dynamiques. Le troisième module fait l'ordonnancement des produits et des reconfigurations. Le dernier module est le contrôle du système permettant la rétroaction lors d'une turbulence ou de la fin d'un horizon. Ce module détermine la sensibilité du système. Néanmoins, ce mode de production n'est encore qu'à un stade embryonnaire et il reste beaucoup d'éléments à développer, à valider et à expérimenter.

Ce mémoire porte principalement sur le développement de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques. Les SMCD ne seraient pas concevables sans l'existence de cet algorithme. En effet, il fallait avoir la certitude de toujours avoir une solution réalisable à chaque itération, peu importe les conditions environnementales. Or, il a été démontré dans ce mémoire que

l'algorithme du coût marginal minimal donne toujours une solution réalisable. Il est le pivot rendant pertinent et possible l'élaboration des autres modules.

Cet algorithme se base principalement sur des critères économiques. Il cherche à minimiser la somme des coûts marginaux de manutention et des coûts de configuration des postes de travail. La notion de coûts marginaux de manutention correspond aux coûts encourus lors des échanges interzones et exclue les coûts intrazones considérés comme les plus petits coûts possibles. Il est important d'adopter une stratégie pour l'élaboration des coûts de manutention et de configuration puisqu'elle influencera l'ensemble des performances du système et de l'usine.

L'expérimentation a satisfait les 3 objectifs fixés. Le premier démontre que l'algorithme du coût minimal marginal donne toujours une solution optimisée par rapport à l'aménagement précédent pour un horizon donné. Compte tenu des conditions turbulentes de l'expérimentation, une économie moyenne des coûts de manutentions interzones de 40.9% par itération a été réalisée, prouvant du même coup la pertinence de réévaluer la configuration des cellules dynamiques à la fin de l'horizon de planification.

L'expérimentation a aussi démontré que l'algorithme du coût marginal minimal parvenait à reconfigurer les cellules dynamiques dans un environnement turbulent alors que la PFA de Burbidge n'a pas été en mesure de solutionner aucun des 9 horizons de la simulation. En fait, l'expérimentation a démontré que l'algorithme du coût marginal minimal est un outil puissant qui va bien au delà de l'élaboration d'une configuration cellulaire. Il définit le meilleur aménagement d'une usine en minimisant les coûts de manutention des flux de production d'un horizon connu tout en respectant les contraintes physiques et économiques de l'usine. Ainsi, il configure l'usine selon une organisation en ligne, cellulaire, en ateliers multigammes ou, plus fréquemment, en une combinaison hybride respectant davantage les fondements des cellules virtuelles et dynamiques. L'objectif principal d'un aménagement étant de

minimiser la manutention, c'est exactement ce que fait l'algorithme du coût marginal minimal.

Finalement, l'expérimentation laisse entrevoir le plein potentiel des SMCD. Ce mode de production semble répondre habilement aux turbulences grâce à sa faculté de reconfigurer les installations industrielles afin d'optimiser les flux de production. Alors que le concept cellulaire classique n'a pu s'appliquer dans les conditions expérimentales, le concept cellulaire dynamique a démontré une réduction globale des coûts marginaux de manutention de 37% par rapport à l'aménagement en ateliers multigammes. Malgré l'absence des autres modules, le concept cellulaire dynamique s'est avéré supérieur au mode de production en ateliers spécialisés et en cellules statiques en ce qui a trait à une optimisation des flux de production.

Il semble que les SMCD soient un mode de production prometteur, mais il y a plusieurs champs de recherche qui n'ont pas été couverts par ce mémoire. L'optimisation de l'attribution des postes de travail et l'ordonnancement du déplacement des postes de travail à l'intérieur de l'horizon en sont des exemples. Il y a aussi la détermination des diverses stratégies d'enclenchement d'une reconfiguration, sans oublier les différents designs expérimentaux permettant de délimiter les propriétés des SMCD. C'est une opportunité pour les autres chercheurs d'explorer un nouveau concept où très peu a été fait, et où tout reste à explorer.

Ce mémoire a établi les bases de ce nouveau mode de production et fourni le moteur donnant la puissance nécessaire, grâce à l'algorithme du coût marginal minimal, pour développer un système manufacturier capable d'affronter les défis des industries du 21^e siècle.

5. Références

ASKIN, R. G., ET C. R. STANDRIDGE, (1993), In: *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, John Wiley & Sons, inc., New York, US.

CHEN, I. J. AND C. H. CHUNG, (1991), Effects of Loading and routing decisions on performance of flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, vol. **29**, no. 11, pp. 2209-2225.

CHOBINEH, F., (1988), A framework for the design of cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, vol. **26**, no. 7, pp. 1161-1172.

CURRIE, K. R., (1992), An intelligent grouping algorithm for cellular manufacturing, *Computers and Industrial Engineering*, vol. **23**, no. 1-4, pp. 109-112.

DELANEY, D., J. W. HERRMANN *et al.*, (1995), Design and implementation of a hybrid manufacturing facility, *Computer and industrial Engineering*, vol. **29**, no. 1-4, pp. 315-320, septembre.

DROLET, J., (1989), *Schedulling Virtual Cellular Manufacturing Systems*, Thèse de doctorat, School of Industrial Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, US.

DROLET, J., B. MONTREUIL ET C. L. MOODIE, (1989(1)), Scheduling factories of the future, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol **20**, pp. 183-194.

DROLET, J., B. MONTREUIL ET C. L. MOODIE, (1989(2)), Decision Architecture for Scheduling Virtual Cellular Manufacturing Systems, *Compte rendu de IFAC International Workshop on Decisional Structures in Automated Manufacturing*, Gène, Italie, pp. 103-112, septembre.

DROLET, J., B. MONTREUIL ET C. L. MOODIE, (1995), Scheduling Framework for Virtual Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Manufacturing System Design*, World Scientific Publishing Company, vol. **1**, no 4, pp. 351-365.

DROLET, J., G. ABDULNOUR AND M. RHEAULT, (1996), The Cellular Manufacturing Evolution, *Computer and industrial Engineering*, vol. **31**, no. 1/2, pp. 139-142, octobre 1996.

FRANCIS, L. R., L. F. MC GINNIS Jr AND J. A. WHITE, (1992), In : *Facility Layout And Location : An Analytical Approach*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, US.

GREENE, T. J. AND R. P. SADOWSKI, (1984), Cellular Manufacturing Control, *Journal of Manufacturing Control*, vol. 2, no. 2, pp. 137-145.

GREENE, T. J. AND C. M. CLEARY, (1985), Is Cellular Manufacturing Right For You ?, *1985 Annual International industrial Engineering Conference Proceeding*, pp. 181-190.

HARVEY S., (1992), *Modélisation et implantation orienté organisme d'un système manufacturier cellulaire virtuel*, Essai de maîtrise, Faculté des sciences et de l'administration de l'université Laval, Qc, Canada.

HAYES, R. H. AND G. P. PISANO, (1994), Beyond World-Class : The new manufacturing strategy, *Havard Business Review*, pp. 77-86, janvier-février.

IRANI, S. A., (1993), Some new insights on design of cellular manufacturing systems, *2nd Industrial Engineering Research Conference Proceedings*, IIE, pp. 51-55.

JACKSON, R. H. F. ET A. W. T. JONES, (1987), An architecture for decision making in the Factory of the future, *INTERFACES*, vol. 17, no. 6, p. 15-28, novembre-décembre 1987.

KUSIAK, A AND S. HERAGU, (1987), Group Technology, *Computer in Industries*, no. 9, pp. 83-91.

MASUYAMA, A., (1985), Idea and practice of flexible manufacturing system of Toyota, *Flexible Manufacturing, Recent Developpement in FMS, Robotics, CAD/CAM, CIM*, Elsevier, pp. 141-152

MCLEAN, C. R., H. M. BLOOM AND T. H. HOPP, (1982), The Virtual Manufacturing Cell, *Proceeding of 4th IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology*, Gaithersburg, MD, US.

MONTREUIL, B., U. VENKATADRI AND P. LEFRANÇOIS, (1991), Holographic layout of manufacturing systems, *19th IIE System integration Conference, Orlando, Florida, US*, octobre.

MONTREUIL, B., J. DROLET AND P. LEFRANÇOIS, (1992), Conception et gestion de systèmes manufacturiers cellulaires virtuels, *Challenging Traditional Thinking Annual International Conference 1992*, Proceeding of APICS 35th International conference and exhibition, Montréal, Qc, Canada, publ. by APICS, Falls Church, VA, US, pp. 410-414.

MONTREUIL, B. *et al*, (1993), Layout for Chaos - Holographic Layout of Manufacturing Systems Operating in Highly Volatile Environments, *Disponible sous la forme de Document de travail GRGL 93-53*, Université Laval, Qc, Canada.

MUKHOPADHYAY, S. K., B. MAITI AND S. GARG, (1991), Heuristic solution to scheduling problems in flexible manufacturing system, *International Journal of Production Research*, vol. **29**, no. 10, p. 2003-2024.

RAJMANI, D., N. SINGH AND Y. P. ANEJA, (1992), A model for cell formation in manufacturing systems with sequences dependence, *International Journal of Production Research*, vol. **30**, no. 6, pp. 1227-1235.

RAMUDHIN, A. ET R. ROCHETTE, (1991), Just-in-Time practices in an unstable environment : A simulation study, *Document disponible au Département de Génie Industriel de L'UQTR*, C.P. 500, Trois-Rivières, Qc, Canada.

RHEAULT, M., J. DROLET AND G. ABDULNOUR, (1995), Physically Reconfigurable Virtual Cells : A Dynamic Model for a Highly Dynamic Environment, *Computer and industrial Engineering*, vol. **29**, no. 1-4, pp. 221-225, septembre.

RHEAULT, M., J. DROLET AND G. ABDULNOUR, (1996(1)), Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS), *Computer and industrial Engineering*, vol. **31**, no. 1/2, pp. 143-146, octobre.

RHEAULT, M., J. DROLET AND G. ABDULNOUR, (1996(2)), Les cellules dynamiques : un concept pour PME, *Actes du 3^e Congrès international francophone de la PME*, CIFPME 96, Trois-Rivières, Qc, Canada, Tome **2**, octobre.

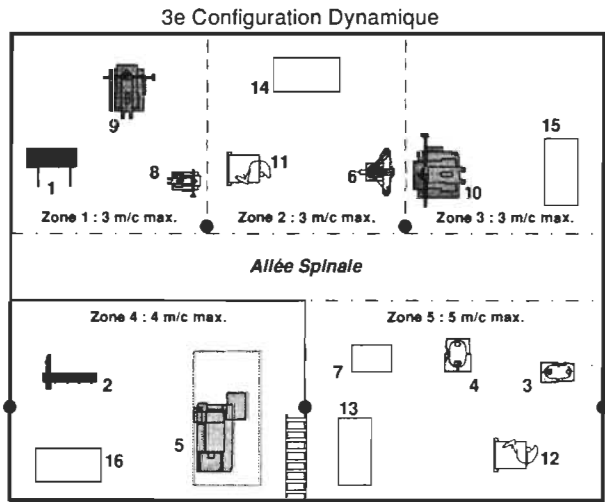
RUBEN, R. A., C. T. MOSIER AND F. MAHMOODI, (1993), A comprehensive analysis of group scheduling heuristics in a job shop cell, *International Journal of Production Research*, vol **31**, , pp. 1483-1509.

SEIFODDINI, H. AND M. DJASSEMI, (1996), Sensitivity analysis in cellular manufacturing system in the case of product mix variation, *Computer and industrial Engineering*, vol. **31**, no. 1/2, pp. 163-166, octobre.

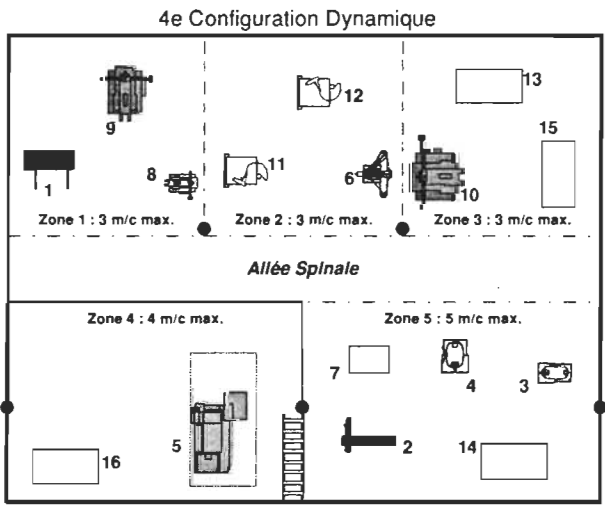
TOMPKINS, J. A. AND J. A. WHITE, (1984), In : *Facility Planning*, John Wiley & Sons, inc., New York, US.

Annexe A.

Présentation des configurations pour chaque horizon de planification accompagnées de leur matrice produits/postes de Burbidge (PFA).

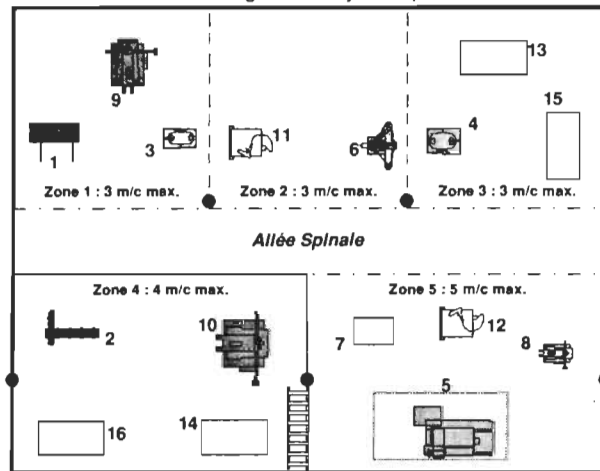


Produits														
	7	44	61	55	35	43	10	58	54	27	49	15		
1	1	1	1	1	1									
2	1	1				1								
12	1		1				1							
4	1							1						
16		1												
14			1	1		1			1	1				
3			1						1			1		
5				1	1									
8					1				1				1	
9				1					1					1
11						1				1				
7							1	1			1	1		
13							1	1				1		
15													1	
6											1			
10														



Produits				
	4	29	68	50
4	1	1	1	1
8	1			
14		1	1	
1		1		
3		1		
2			1	
11				1
12				1
5				
6				
7				
9				
10				
13				
15				
16				

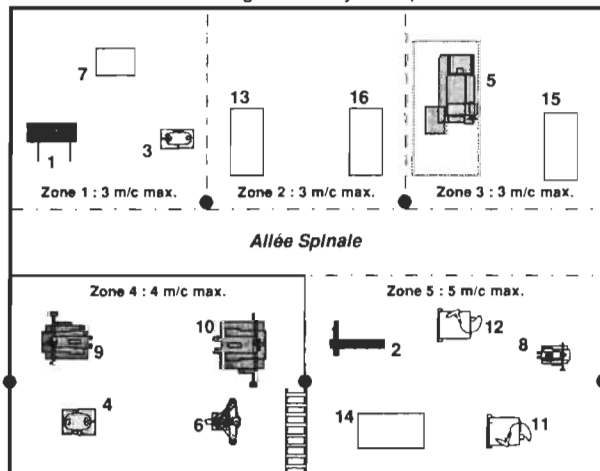
5e Configuration Dynamique



Produits

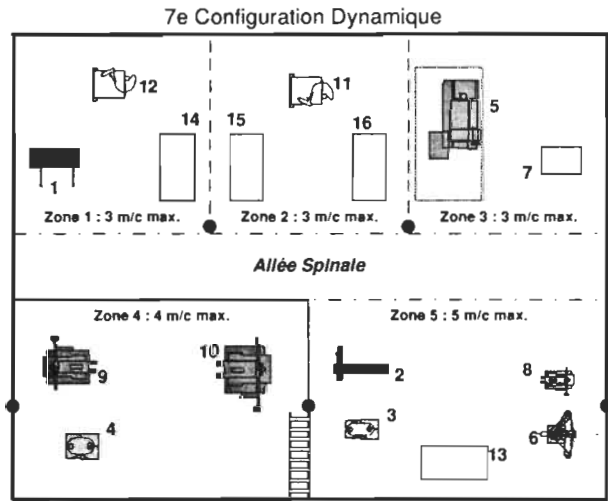
	32	62	70	64	33	9	51	75	72	19	28
14	1	1	1	1	1						
3	1	1				1					
5	1		1				1	1			
1	1										
11		1	1			1					
9		1		1							
12			1			1	1		1	1	1
2				1							
4				1							
10					1			1			
6						1					
7							1		1		
8							1				
13								1		1	1
15											
16											

6e Configuration Dynamique

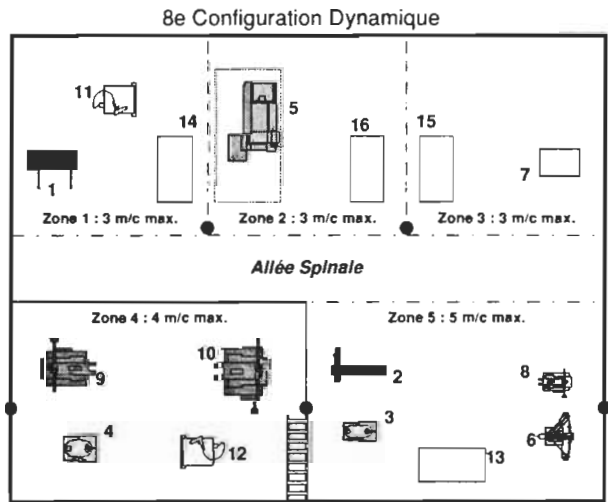


Produits

	18	37	40	60	56	8	57	69	45
8	1	1	1	1					
1	1	1							
6	1		1		1				
7	1								
11		1		1		1			
5			1	1					
10			1						
4					1				
2						1			
12						1			
14						1			
9							1	1	
3									
13									
15									
16									



		Produits					
P o s t e s		11	13	36	48	20	42
	2	1	1	1	1		
	7	1				1	
	12	1					1
	11	1					
	1		1	1			
	13		1		1		1
	6		1				
	5			1		1	
	14			1			1
	8				1		1
	3				1		
	4						
	9						
	10						
	15						
	16						



		Produits							
P o s t e s		26	65	17	30	23	21	59	12
	1	1	1						
	3	1		1	1				
	2	1		1					
	4	1				1	1	1	
	12		1	1		1	1		1
	10		1					1	1
	14		1						1
	8				1	1			
	13				1				
	5					1			
	9						1		
	11						1		
	6								
	7								
	15								
	16								

Annexe B.

Exemple de formulation de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration

!**** Code genere pour LINDO ****

BAT

MIN 30000 X1a2 + 30000 X1a3 + 30000 X1a4 + 30000 X1a5 +
 1300 X2a1 + 1400 X2a2 + 1600 X2a3 + 1600 X2a5 +
 2100 X3a1 + 1900 X3a2 + 1800 X3a3 + 2100 X3a4 +
 2600 X4a1 + 2400 X4a2 + 2300 X4a3 + 2600 X4a4 +
 2800 X5a1 + 2900 X5a2 + 3100 X5a3 + 3100 X5a5 +
 3500 X6a1 + 3500 X6a3 + 3400 X6a4 + 3400 X6a5 +
 4100 X7a1 + 3900 X7a2 + 3800 X7a3 + 4100 X7a4 +
 4500 X8a2 + 4700 X8a3 + 4300 X8a4 + 4600 X8a5 +
 5000 X9a2 + 5200 X9a3 + 4800 X9a4 + 5100 X9a5 +
 5700 X10a1 + 5500 X10a2 + 5600 X10a4 + 5300 X10a5 +
 1000 X11a1 + 1000 X11a3 + 900 X11a4 + 900 X11a5 +
 1600 X12a1 + 1400 X12a2 + 1300 X12a3 + 1600 X12a4 +
 2100 X13a1 + 1900 X13a2 + 1800 X13a3 + 2100 X13a4 +
 2500 X14a1 + 2500 X14a3 + 2400 X14a4 + 2400 X14a5 +
 3200 X15a1 + 3000 X15a2 + 3100 X15a4 + 2800 X15a5 +
 3300 X16a1 + 3400 X16a2 + 3600 X16a3 + 3600 X16a5 +
 91 D1a3 + 231 D2a4 + 231 D2a14 + 91 D3a4 +
 231 D4a2 + 70 D4a8 + 133 D4a11 + 91 D4a14 +
 133 D11a12

!

SUBJECT TO

!

! *** CONTRAINTES DE CAPACITE DES ZONES ***

10 X1a1 + 10 X2a1 + 10 X3a1 + 10 X4a1 +
 20 X5a1 + 10 X6a1 + 10 X7a1 + 10 X8a1 +
 10 X9a1 + 10 X10a1 + 10 X11a1 + 10 X12a1 +
 10 X13a1 + 10 X14a1 + 10 X15a1 + 10 X16a1 <= 30
 10 X1a2 + 10 X2a2 + 10 X3a2 + 10 X4a2 +
 20 X5a2 + 10 X6a2 + 10 X7a2 + 10 X8a2 +
 10 X9a2 + 10 X10a2 + 10 X11a2 + 10 X12a2 +
 10 X13a2 + 10 X14a2 + 10 X15a2 + 10 X16a2 <= 30
 10 X1a3 + 10 X2a3 + 10 X3a3 + 10 X4a3 +
 20 X5a3 + 10 X6a3 + 10 X7a3 + 10 X8a3 +
 10 X9a3 + 10 X10a3 + 10 X11a3 + 10 X12a3 +
 10 X13a3 + 10 X14a3 + 10 X15a3 + 10 X16a3 <= 30
 10 X1a4 + 10 X2a4 + 10 X3a4 + 10 X4a4 +
 20 X5a4 + 10 X6a4 + 10 X7a4 + 10 X8a4 +
 10 X9a4 + 10 X10a4 + 10 X11a4 + 10 X12a4 +
 10 X13a4 + 10 X14a4 + 10 X15a4 + 10 X16a4 <= 40
 10 X1a5 + 10 X2a5 + 10 X3a5 + 10 X4a5 +

$20 X_{5a5} + 10 X_{6a5} + 10 X_{7a5} + 10 X_{8a5} +$
 $10 X_{9a5} + 10 X_{10a5} + 10 X_{11a5} + 10 X_{12a5} +$
 $10 X_{13a5} + 10 X_{14a5} + 10 X_{15a5} + 10 X_{16a5} \leq 50$

!

! *** CONTRAINTES D'EXCLUSIVITE DE MACHINES ***

$X_{1a1} + X_{1a2} + X_{1a3} + X_{1a4} + X_{1a5} = 1$
 $X_{2a1} + X_{2a2} + X_{2a3} + X_{2a4} + X_{2a5} = 1$
 $X_{3a1} + X_{3a2} + X_{3a3} + X_{3a4} + X_{3a5} = 1$
 $X_{4a1} + X_{4a2} + X_{4a3} + X_{4a4} + X_{4a5} = 1$
 $X_{5a1} + X_{5a2} + X_{5a3} + X_{5a4} + X_{5a5} = 1$
 $X_{6a1} + X_{6a2} + X_{6a3} + X_{6a4} + X_{6a5} = 1$
 $X_{7a1} + X_{7a2} + X_{7a3} + X_{7a4} + X_{7a5} = 1$
 $X_{8a1} + X_{8a2} + X_{8a3} + X_{8a4} + X_{8a5} = 1$
 $X_{9a1} + X_{9a2} + X_{9a3} + X_{9a4} + X_{9a5} = 1$
 $X_{10a1} + X_{10a2} + X_{10a3} + X_{10a4} + X_{10a5} = 1$
 $X_{11a1} + X_{11a2} + X_{11a3} + X_{11a4} + X_{11a5} = 1$
 $X_{12a1} + X_{12a2} + X_{12a3} + X_{12a4} + X_{12a5} = 1$
 $X_{13a1} + X_{13a2} + X_{13a3} + X_{13a4} + X_{13a5} = 1$
 $X_{14a1} + X_{14a2} + X_{14a3} + X_{14a4} + X_{14a5} = 1$
 $X_{15a1} + X_{15a2} + X_{15a3} + X_{15a4} + X_{15a5} = 1$
 $X_{16a1} + X_{16a2} + X_{16a3} + X_{16a4} + X_{16a5} = 1$

!

! *** CONTRAINTES RESTRICTIVES DES DISTANCES INTER-PROCESSEURS ***

$10000 X_{1a1} + 10000 X_{3a1} - D_{1a3} \leq 20000$
 $10000 X_{1a1} + 10000 X_{3a2} - D_{1a3} \leq 19950$
 $10000 X_{1a1} + 10000 X_{3a3} - D_{1a3} \leq 19930$
 $10000 X_{1a1} + 10000 X_{3a4} - D_{1a3} \leq 19965$
 $10000 X_{1a1} + 10000 X_{3a5} - D_{1a3} \leq 19935$
 $10000 X_{1a2} + 10000 X_{3a1} - D_{1a3} \leq 19950$
 $10000 X_{1a2} + 10000 X_{3a2} - D_{1a3} \leq 20000$
 $10000 X_{1a2} + 10000 X_{3a3} - D_{1a3} \leq 19950$
 $10000 X_{1a2} + 10000 X_{3a4} - D_{1a3} \leq 19955$
 $10000 X_{1a2} + 10000 X_{3a5} - D_{1a3} \leq 19955$
 $10000 X_{1a3} + 10000 X_{3a1} - D_{1a3} \leq 19930$
 $10000 X_{1a3} + 10000 X_{3a2} - D_{1a3} \leq 19950$
 $10000 X_{1a3} + 10000 X_{3a3} - D_{1a3} \leq 20000$
 $10000 X_{1a3} + 10000 X_{3a4} - D_{1a3} \leq 19935$
 $10000 X_{1a3} + 10000 X_{3a5} - D_{1a3} \leq 19965$
 $10000 X_{1a4} + 10000 X_{3a1} - D_{1a3} \leq 19965$
 $10000 X_{1a4} + 10000 X_{3a2} - D_{1a3} \leq 19955$
 $10000 X_{1a4} + 10000 X_{3a3} - D_{1a3} \leq 19935$
 $10000 X_{1a4} + 10000 X_{3a4} - D_{1a3} \leq 20000$
 $10000 X_{1a4} + 10000 X_{3a5} - D_{1a3} \leq 19940$

10000 X1a5 + 10000 X3a1 - D1a3 <= 19935
 10000 X1a5 + 10000 X3a2 - D1a3 <= 19955
 10000 X1a5 + 10000 X3a3 - D1a3 <= 19965
 10000 X1a5 + 10000 X3a4 - D1a3 <= 19940
 10000 X1a5 + 10000 X3a5 - D1a3 <= 20000
 10000 X2a1 + 10000 X4a1 - D2a4 <= 20000
 10000 X2a1 + 10000 X4a2 - D2a4 <= 19950
 10000 X2a1 + 10000 X4a3 - D2a4 <= 19930
 10000 X2a1 + 10000 X4a4 - D2a4 <= 19965
 10000 X2a1 + 10000 X4a5 - D2a4 <= 19935
 10000 X2a2 + 10000 X4a1 - D2a4 <= 19950
 10000 X2a2 + 10000 X4a2 - D2a4 <= 20000
 10000 X2a2 + 10000 X4a3 - D2a4 <= 19950
 10000 X2a2 + 10000 X4a4 - D2a4 <= 19955
 10000 X2a2 + 10000 X4a5 - D2a4 <= 19955
 10000 X2a3 + 10000 X4a1 - D2a4 <= 19930
 10000 X2a3 + 10000 X4a2 - D2a4 <= 19950
 10000 X2a3 + 10000 X4a3 - D2a4 <= 20000
 10000 X2a3 + 10000 X4a4 - D2a4 <= 19935
 10000 X2a3 + 10000 X4a5 - D2a4 <= 19965
 10000 X2a4 + 10000 X4a1 - D2a4 <= 19965
 10000 X2a4 + 10000 X4a2 - D2a4 <= 19955
 10000 X2a4 + 10000 X4a3 - D2a4 <= 19935
 10000 X2a4 + 10000 X4a4 - D2a4 <= 20000
 10000 X2a4 + 10000 X4a5 - D2a4 <= 19940
 10000 X2a5 + 10000 X4a1 - D2a4 <= 19935
 10000 X2a5 + 10000 X4a2 - D2a4 <= 19955
 10000 X2a5 + 10000 X4a3 - D2a4 <= 19965
 10000 X2a5 + 10000 X4a4 - D2a4 <= 19940
 10000 X2a5 + 10000 X4a5 - D2a4 <= 20000
 10000 X2a1 + 10000 X14a1 - D2a14 <= 20000
 10000 X2a1 + 10000 X14a2 - D2a14 <= 19950
 10000 X2a1 + 10000 X14a3 - D2a14 <= 19930
 10000 X2a1 + 10000 X14a4 - D2a14 <= 19965
 10000 X2a1 + 10000 X14a5 - D2a14 <= 19935
 10000 X2a2 + 10000 X14a1 - D2a14 <= 19950
 10000 X2a2 + 10000 X14a2 - D2a14 <= 20000
 10000 X2a2 + 10000 X14a3 - D2a14 <= 19950
 10000 X2a2 + 10000 X14a4 - D2a14 <= 19955
 10000 X2a2 + 10000 X14a5 - D2a14 <= 19955
 10000 X2a3 + 10000 X14a1 - D2a14 <= 19930
 10000 X2a3 + 10000 X14a2 - D2a14 <= 19950
 10000 X2a3 + 10000 X14a3 - D2a14 <= 20000

$10000 X2a3 + 10000 X14a4 - D2a14 \leq 19935$
 $10000 X2a3 + 10000 X14a5 - D2a14 \leq 19965$
 $10000 X2a4 + 10000 X14a1 - D2a14 \leq 19965$
 $10000 X2a4 + 10000 X14a2 - D2a14 \leq 19955$
 $10000 X2a4 + 10000 X14a3 - D2a14 \leq 19935$
 $10000 X2a4 + 10000 X14a4 - D2a14 \leq 20000$
 $10000 X2a4 + 10000 X14a5 - D2a14 \leq 19940$
 $10000 X2a5 + 10000 X14a1 - D2a14 \leq 19935$
 $10000 X2a5 + 10000 X14a2 - D2a14 \leq 19955$
 $10000 X2a5 + 10000 X14a3 - D2a14 \leq 19965$
 $10000 X2a5 + 10000 X14a4 - D2a14 \leq 19940$
 $10000 X2a5 + 10000 X14a5 - D2a14 \leq 20000$
 $10000 X3a1 + 10000 X4a1 - D3a4 \leq 20000$
 $10000 X3a1 + 10000 X4a2 - D3a4 \leq 19950$
 $10000 X3a1 + 10000 X4a3 - D3a4 \leq 19930$
 $10000 X3a1 + 10000 X4a4 - D3a4 \leq 19965$
 $10000 X3a1 + 10000 X4a5 - D3a4 \leq 19935$
 $10000 X3a2 + 10000 X4a1 - D3a4 \leq 19950$
 $10000 X3a2 + 10000 X4a2 - D3a4 \leq 20000$
 $10000 X3a2 + 10000 X4a3 - D3a4 \leq 19950$
 $10000 X3a2 + 10000 X4a4 - D3a4 \leq 19955$
 $10000 X3a2 + 10000 X4a5 - D3a4 \leq 19955$
 $10000 X3a3 + 10000 X4a1 - D3a4 \leq 19930$
 $10000 X3a3 + 10000 X4a2 - D3a4 \leq 19950$
 $10000 X3a3 + 10000 X4a3 - D3a4 \leq 20000$
 $10000 X3a3 + 10000 X4a4 - D3a4 \leq 19935$
 $10000 X3a3 + 10000 X4a5 - D3a4 \leq 19965$
 $10000 X3a4 + 10000 X4a1 - D3a4 \leq 19965$
 $10000 X3a4 + 10000 X4a2 - D3a4 \leq 19955$
 $10000 X3a4 + 10000 X4a3 - D3a4 \leq 19935$
 $10000 X3a4 + 10000 X4a4 - D3a4 \leq 20000$
 $10000 X3a4 + 10000 X4a5 - D3a4 \leq 19940$
 $10000 X3a5 + 10000 X4a1 - D3a4 \leq 19935$
 $10000 X3a5 + 10000 X4a2 - D3a4 \leq 19955$
 $10000 X3a5 + 10000 X4a3 - D3a4 \leq 19965$
 $10000 X3a5 + 10000 X4a4 - D3a4 \leq 19940$
 $10000 X3a5 + 10000 X4a5 - D3a4 \leq 20000$
 $10000 X4a1 + 10000 X2a1 - D4a2 \leq 20000$
 $10000 X4a1 + 10000 X2a2 - D4a2 \leq 19950$
 $10000 X4a1 + 10000 X2a3 - D4a2 \leq 19930$
 $10000 X4a1 + 10000 X2a4 - D4a2 \leq 19965$
 $10000 X4a1 + 10000 X2a5 - D4a2 \leq 19935$
 $10000 X4a2 + 10000 X2a1 - D4a2 \leq 19950$

$10000 X_{4a2} + 10000 X_{2a2} - D_{4a2} \leq 20000$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{2a3} - D_{4a2} \leq 19950$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{2a4} - D_{4a2} \leq 19955$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{2a5} - D_{4a2} \leq 19955$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{2a1} - D_{4a2} \leq 19930$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{2a2} - D_{4a2} \leq 19950$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{2a3} - D_{4a2} \leq 20000$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{2a4} - D_{4a2} \leq 19935$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{2a5} - D_{4a2} \leq 19965$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{2a1} - D_{4a2} \leq 19965$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{2a2} - D_{4a2} \leq 19955$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{2a3} - D_{4a2} \leq 19935$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{2a4} - D_{4a2} \leq 20000$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{2a5} - D_{4a2} \leq 19940$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{2a1} - D_{4a2} \leq 19935$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{2a2} - D_{4a2} \leq 19955$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{2a3} - D_{4a2} \leq 19965$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{2a4} - D_{4a2} \leq 19940$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{2a5} - D_{4a2} \leq 20000$
 $10000 X_{4a1} + 10000 X_{8a1} - D_{4a8} \leq 20000$
 $10000 X_{4a1} + 10000 X_{8a2} - D_{4a8} \leq 19950$
 $10000 X_{4a1} + 10000 X_{8a3} - D_{4a8} \leq 19930$
 $10000 X_{4a1} + 10000 X_{8a4} - D_{4a8} \leq 19965$
 $10000 X_{4a1} + 10000 X_{8a5} - D_{4a8} \leq 19935$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{8a1} - D_{4a8} \leq 19950$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{8a2} - D_{4a8} \leq 20000$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{8a3} - D_{4a8} \leq 19950$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{8a4} - D_{4a8} \leq 19955$
 $10000 X_{4a2} + 10000 X_{8a5} - D_{4a8} \leq 19955$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{8a1} - D_{4a8} \leq 19930$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{8a2} - D_{4a8} \leq 19950$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{8a3} - D_{4a8} \leq 20000$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{8a4} - D_{4a8} \leq 19935$
 $10000 X_{4a3} + 10000 X_{8a5} - D_{4a8} \leq 19965$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{8a1} - D_{4a8} \leq 19965$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{8a2} - D_{4a8} \leq 19955$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{8a3} - D_{4a8} \leq 19935$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{8a4} - D_{4a8} \leq 20000$
 $10000 X_{4a4} + 10000 X_{8a5} - D_{4a8} \leq 19940$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{8a1} - D_{4a8} \leq 19935$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{8a2} - D_{4a8} \leq 19955$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{8a3} - D_{4a8} \leq 19965$
 $10000 X_{4a5} + 10000 X_{8a4} - D_{4a8} \leq 19940$

10000 X4a5 + 10000 X8a5 - D4a8 <= 20000
 10000 X4a1 + 10000 X11a1 - D4a11 <= 20000
 10000 X4a1 + 10000 X11a2 - D4a11 <= 19950
 10000 X4a1 + 10000 X11a3 - D4a11 <= 19930
 10000 X4a1 + 10000 X11a4 - D4a11 <= 19965
 10000 X4a1 + 10000 X11a5 - D4a11 <= 19935
 10000 X4a2 + 10000 X11a1 - D4a11 <= 19950
 10000 X4a2 + 10000 X11a2 - D4a11 <= 20000
 10000 X4a2 + 10000 X11a3 - D4a11 <= 19950
 10000 X4a2 + 10000 X11a4 - D4a11 <= 19955
 10000 X4a2 + 10000 X11a5 - D4a11 <= 19955
 10000 X4a3 + 10000 X11a1 - D4a11 <= 19930
 10000 X4a3 + 10000 X11a2 - D4a11 <= 19950
 10000 X4a3 + 10000 X11a3 - D4a11 <= 20000
 10000 X4a3 + 10000 X11a4 - D4a11 <= 19935
 10000 X4a3 + 10000 X11a5 - D4a11 <= 19965
 10000 X4a4 + 10000 X11a1 - D4a11 <= 19965
 10000 X4a4 + 10000 X11a2 - D4a11 <= 19955
 10000 X4a4 + 10000 X11a3 - D4a11 <= 19935
 10000 X4a4 + 10000 X11a4 - D4a11 <= 20000
 10000 X4a4 + 10000 X11a5 - D4a11 <= 19940
 10000 X4a5 + 10000 X11a1 - D4a11 <= 19935
 10000 X4a5 + 10000 X11a2 - D4a11 <= 19955
 10000 X4a5 + 10000 X11a3 - D4a11 <= 19965
 10000 X4a5 + 10000 X11a4 - D4a11 <= 19940
 10000 X4a5 + 10000 X11a5 - D4a11 <= 20000
 10000 X4a1 + 10000 X14a1 - D4a14 <= 20000
 10000 X4a1 + 10000 X14a2 - D4a14 <= 19950
 10000 X4a1 + 10000 X14a3 - D4a14 <= 19930
 10000 X4a1 + 10000 X14a4 - D4a14 <= 19965
 10000 X4a1 + 10000 X14a5 - D4a14 <= 19935
 10000 X4a2 + 10000 X14a1 - D4a14 <= 19950
 10000 X4a2 + 10000 X14a2 - D4a14 <= 20000
 10000 X4a2 + 10000 X14a3 - D4a14 <= 19950
 10000 X4a2 + 10000 X14a4 - D4a14 <= 19955
 10000 X4a2 + 10000 X14a5 - D4a14 <= 19955
 10000 X4a3 + 10000 X14a1 - D4a14 <= 19930
 10000 X4a3 + 10000 X14a2 - D4a14 <= 19950
 10000 X4a3 + 10000 X14a3 - D4a14 <= 20000
 10000 X4a3 + 10000 X14a4 - D4a14 <= 19935
 10000 X4a3 + 10000 X14a5 - D4a14 <= 19965
 10000 X4a4 + 10000 X14a1 - D4a14 <= 19965
 10000 X4a4 + 10000 X14a2 - D4a14 <= 19955

```

10000 X4a4 + 10000 X14a3 - D4a14 <= 19935
10000 X4a4 + 10000 X14a4 - D4a14 <= 20000
10000 X4a4 + 10000 X14a5 - D4a14 <= 19940
10000 X4a5 + 10000 X14a1 - D4a14 <= 19935
10000 X4a5 + 10000 X14a2 - D4a14 <= 19955
10000 X4a5 + 10000 X14a3 - D4a14 <= 19965
10000 X4a5 + 10000 X14a4 - D4a14 <= 19940
10000 X4a5 + 10000 X14a5 - D4a14 <= 20000
10000 X11a1 + 10000 X12a1 - D11a12 <= 20000
10000 X11a1 + 10000 X12a2 - D11a12 <= 19950
10000 X11a1 + 10000 X12a3 - D11a12 <= 19930
10000 X11a1 + 10000 X12a4 - D11a12 <= 19965
10000 X11a1 + 10000 X12a5 - D11a12 <= 19935
10000 X11a2 + 10000 X12a1 - D11a12 <= 19950
10000 X11a2 + 10000 X12a2 - D11a12 <= 20000
10000 X11a2 + 10000 X12a3 - D11a12 <= 19950
10000 X11a2 + 10000 X12a4 - D11a12 <= 19955
10000 X11a2 + 10000 X12a5 - D11a12 <= 19955
10000 X11a3 + 10000 X12a1 - D11a12 <= 19930
10000 X11a3 + 10000 X12a2 - D11a12 <= 19950
10000 X11a3 + 10000 X12a3 - D11a12 <= 20000
10000 X11a3 + 10000 X12a4 - D11a12 <= 19935
10000 X11a3 + 10000 X12a5 - D11a12 <= 19965
10000 X11a4 + 10000 X12a1 - D11a12 <= 19965
10000 X11a4 + 10000 X12a2 - D11a12 <= 19955
10000 X11a4 + 10000 X12a3 - D11a12 <= 19935
10000 X11a4 + 10000 X12a4 - D11a12 <= 20000
10000 X11a4 + 10000 X12a5 - D11a12 <= 19940
10000 X11a5 + 10000 X12a1 - D11a12 <= 19935
10000 X11a5 + 10000 X12a2 - D11a12 <= 19955
10000 X11a5 + 10000 X12a3 - D11a12 <= 19965
10000 X11a5 + 10000 X12a4 - D11a12 <= 19940
10000 X11a5 + 10000 X12a5 - D11a12 <= 20000

!
! *** CONTRAINTES D'INCOMPATIBILITE DE PROCESSEURS ***
!
! *** CONTRAINTES D'EXCLUSION DE ZONE ***

!
! *** CONTRAINTES D'ASSOCIATION DE PROCESSEURS ***
END
INT X1a1

```

INT X1a2
INT X1a3
INT X1a4
INT X1a5
INT X2a1
INT X2a2
INT X2a3
INT X2a4
INT X2a5
INT X3a1
INT X3a2
INT X3a3
INT X3a4
INT X3a5
INT X4a1
INT X4a2
INT X4a3
INT X4a4
INT X4a5
INT X5a1
INT X5a2
INT X5a3
INT X5a4
INT X5a5
INT X6a1
INT X6a2
INT X6a3
INT X6a4
INT X6a5
INT X7a1
INT X7a2
INT X7a3
INT X7a4
INT X7a5
INT X8a1
INT X8a2
INT X8a3
INT X8a4
INT X8a5
INT X9a1
INT X9a2
INT X9a3
INT X9a4

INT X9a5
 INT X10a1
 INT X10a2
 INT X10a3
 INT X10a4
 INT X10a5
 INT X11a1
 INT X11a2
 INT X11a3
 INT X11a4
 INT X11a5
 INT X12a1
 INT X12a2
 INT X12a3
 INT X12a4
 INT X12a5
 INT X13a1
 INT X13a2
 INT X13a3
 INT X13a4
 INT X13a5
 INT X14a1
 INT X14a2
 INT X14a3
 INT X14a4
 INT X14a5
 INT X15a1
 INT X15a2
 INT X15a3
 INT X15a4
 INT X15a5
 INT X16a1
 INT X16a2
 INT X16a3
 INT X16a4
 INT X16a5
 DIVERT d9808c4.out
 TITLE 't_copie04 - Calen1 4481 a 5040'
 IPTOL 0.05
 TITAN
 TERSE
 BIP 120000
 GO 8000000

Le nom du fichier des résultats

Solution bornée à un maximum de 1200\$
 Exécute jusqu'à 8000000 d'itérations

TIME
SOLU
NONZ
LEAVE

Donne le temps cumulatif du CPU
Affiche la solution détaillée
Affiche la valeur des variables non nulles
Termine l'exécution

Annexe C.

Carnet des commandes en ordre de numéro de produit

Produit	gamme opératoire	Nombre de lots de transfert	Coût \$ / unité de longueur	Heure d'arrivée
1	12 - 14	38	0.07	2417
2	9 - 11 - 2	36	0.07	1490
3	3 - 5	34	0.07	2629
4	4 - 8	10	0.07	4587
5	10 - 12 - 15 - 5	37	0.07	7937
6	9 - 4 - 13 - 9	6	0.07	1172
7	1 - 2 - 4 - 12	4	0.07	3436
8	11 - 12 - 14 - 2	34	0.07	5900
9	3 - 12 - 11 - 6	10	0.07	5474
10	7 - 12 - 13	17	0.07	4128
11	2 - 12 - 11 - 7	2	0.07	6518
12	14 - 12 - 10	5	0.07	6974
13	13 - 6 - 2 - 1	35	0.07	6254
14	5 - 11	13	0.07	2919
15	9 - 8	18	0.07	3510
16	5 - 4 - 11 - 3	7	0.07	7317
17	2 - 3 - 12	22	0.07	7116
18	8 - 6 - 7 - 1	8	0.07	5632
19	12 - 13	11	0.07	5450
20	7 - 5	38	0.07	6586
21	4 - 12 - 11 - 9	20	0.07	7167
22	12 - 9 - 3 - 13	6	0.07	2186
23	5 - 12 - 4 - 8	34	0.07	7123
24	4 - 14 - 16 - 12	28	0.07	8350
25	5 - 11	11	0.07	3121
26	2 - 4 - 1 - 3	13	0.07	7233
27	7 - 14 - 11 - 16	37	0.07	4031
28	12 - 13	33	0.07	5209
29	1 - 3 - 4 - 14	13	0.07	4845
30	3 - 13 - 8	15	0.07	7240
31	5 - 9 - 14 - 8	29	0.07	1653
32	3 - 1 - 14 - 5	24	0.07	5453
33	10 - 14 - 10	28	0.07	5436
34	8 - 13 - 8 - 6	17	0.07	9012
35	9 - 1 - 8 - 5	33	0.07	4445
36	2 - 5 - 1 - 14	16	0.07	6527
37	1 - 11 - 8	11	0.07	5947
38	10 - 2 - 6 - 8	1	0.07	3040

39	14 - 4 - 8	35	0.07	2057
40	8 - 10 - 5 - 6	5	0.07	5845
41	8 - 13 - 4 - 7	6	0.07	2744
42	13 - 8 - 12 - 14	25	0.07	6178
43	2 - 14 - 11	11	0.07	3955
44	1 - 2 - 16	2	0.07	3871
45	4 - 10	18	0.07	5614
46	9 - 6 - 4 - 14	20	0.07	7770
47	12 - 14	19	0.07	7605
48	2 - 8 - 3 - 13	33	0.07	6703
49	13 - 3 - 7 - 15	34	0.07	3438
50	4 - 11 - 12	19	0.07	4562
51	7 - 5 - 8 - 12	26	0.07	5090
52	7 - 9 - 6 - 2	24	0.07	2228
53	4 - 9 - 15 - 5	21	0.07	2039
54	14 - 9 - 8 - 3	20	0.07	4348
55	14 - 1 - 5	17	0.07	4168
56	6 - 4	37	0.07	5995
57	4 - 9 - 10	5	0.07	5660
58	7 - 4 - 13	30	0.07	4402
59	4 - 10	9	0.07	6926
60	8 - 11 - 5	15	0.07	5958
61	3 - 1 - 12 - 14	4	0.07	4155
62	11 - 14 - 9 - 3	19	0.07	5379
63	4 - 8	21	0.07	8459
64	4 - 9 - 2 - 14	17	0.07	5405
65	14 - 1 - 12 - 10	22	0.07	6982
66	6 - 4	38	0.07	7804
67	14 - 4 - 10 - 14	17	0.07	3059
68	2 - 4 - 2 - 14	33	0.07	4676
69	4 - 9 - 10	22	0.07	5664
70	14 - 12 - 5 - 11	37	0.07	5050
71	2 - 6 - 14 - 6	4	0.07	3281
72	7 - 12	33	0.07	5267
73	8 - 12 - 1 - 16	38	0.07	3103
74	4 - 9 - 10	35	0.07	582
75	13 - 10 - 5 - 13	4	0.07	5141
76	10 - 14 - 1 - 11	35	0.07	7647
77	1 - 15 - 16 - 8	12	0.07	1800

